

# ***Efecto de las deformaciones diferidas sobre la respuesta estructural a flexión y análisis del comportamiento adherente del hormigón reciclado***

Autora: Sindy Seara Paz

---

Tese de Doutoramento

Abril 2015

Directora: Belén González Fonteboa

Departamento de Tecnoloxía da Construción

Programa de Doutoramento en Enxeñaría Civil<sup>1</sup>

E.T.S. Enxeñeiros de Camiños, Canais e Portos



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

---

<sup>1</sup> Programa regulado polo RD 1393/2007: Programa de doutoramento de Enxeñaría Civil



Dña. **BELÉN GONZÁLEZ FONTEBOA**, Profesora Titular de  
Universidad en el área de Ingeniería de la Construcción de la  
Universidade da Coruña,

HACE CONSTAR QUE:

La memoria **“Efecto de las deformaciones diferidas sobre la respuesta estructural a flexión y análisis del comportamiento adherente del hormigón reciclado”** ha sido realizada por Dña. **Gumersinda Seara Paz**, bajo mi dirección, en el Departamento de Tecnología de la Construcción de la Universidade da Coruña, y constituye la Tesis que presenta para optar al Grado de Doctor en Ingeniería Civil de la Universidade da Coruña con Mención Internacional.

A Coruña, 9 de abril de 2015

Fdo: Dra. Belén González Fonteboa





*“El hombre nunca sabe de lo que es  
capaz hasta que lo intenta”*

*Charles Dickens*

***A Miguel***



## AGRADECIMIENTOS

Esta tesis se ha desarrollado en el marco del proyecto “CLEAM: Construcción Limpia, Eficaz y Amigable con el Medio Ambiente” financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial, CDTI, liderado por la AIE CLEAM-CENIT e integrada por las empresas Acciona, Dragados, Ferrovial, FCC, Isolux Corsán, OHL y Sacyr y las pymes Informática 68, Quilosa y Martínez Segovia y asociados; contando también con el apoyo del proyecto INHORMES (Investigación Industrial sobre hormigones para un mercado sostenible) financiado por la Axencia Galega de Innovación, Programa Conecta PEME, e integrado por las empresas Galaicontrol, Ati Sistemas y K2 Estudio de Ingeniería.

En esta etapa que finaliza, he conocido y trabajado con muchas personas que sin duda, han aportado, en mayor o menor medida, su granito de arena para que esta tesis sea hoy una realidad. A todas ellas muchas gracias.

Quiero agradecer especialmente a Belén, mi directora de tesis, la paciencia y el tiempo que con cariño me ha dedicado, y sobre todo, los consejos y la ayuda recibida tanto personal como profesionalmente. También a Fernando, por la pasión que transmite en todo lo que hace y el apoyo que me ha brindado a lo largo de estos años. A los dos, gracias por hacer que resulte agradable el trabajo y estar siempre dispuestos a ayudarme.

“Moltes gràcies” a Toni y “grazie mille” a Valeria, que junto a su equipo han hecho que durante mis estancias en Barcelona y Ancona me haya sentido como en casa. Ambas experiencias no habrían sido posibles sin la ayuda para movilidad de estudiantes de doctorado mención excelencia 2011-2012 financiada por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, y la beca INDITEX-UDC 2013.

Gracias a todo el laboratorio de construcción de la escuela de Caminos, a mis compañeros del grupo gCons y del CITEEC, con quienes he compartido tantas horas de trabajo, anécdotas y risas. Mención aparte para María, de quien cualquiera que haya pasado por los laboratorios de la Escuela de Caminos de A Coruña guarda un recuerdo especial. Su energía, alegría y dedicación son el motor que los hace funcionar.

No puedo olvidarme de Juan Luis, mi compañero de despacho, con el que tantas veces he compartido penas y alegrías, especialmente este último año, y que siempre ha tenido una palabra de ánimo ante cualquier situación.

A Bea, Nuria y Silvia, quienes probablemente, más me han sufrido durante estos años, y también a Rosa, que aun en la distancia, siempre ha estado ahí.

A mi familia, especialmente a mis padres y mi hermana, que me han apoyado siempre y han entendido, muchas veces con resignación, el tiempo que esta tesis les ha robado. Por último, a Miguel, mi apoyo en todo momento, que está siempre a mi lado compartiendo los éxitos y ayudándome a levantar en los fracasos.

Como en su día dijo Benjamin Franklin “la felicidad humana no se logra con grandes golpes de suerte, que pueden ocurrir pocas veces, sino con pequeñas cosas que ocurren todos los días”. En este caso, creo que además de algún golpe de suerte que me ha dado la oportunidad de estar escribiendo estas últimas líneas, agradezco a todos aquellos que me han rodeado en esta etapa por formar parte de las pequeñas/grandes cosas de cada día.



## RESUMEN

### ***Efecto de las deformaciones diferidas sobre la respuesta estructural a flexión y análisis del comportamiento adherente del hormigón reciclado***

Este trabajo se centra en el estudio de hormigones reciclados para uso estructural, con sustituciones de árido grueso natural por reciclado del 20%, 50% y 100%. Para ello se fabrican dos series de hormigón, una con relación a/c igual a 0.50, que conferirá a los hormigones resistencias elevadas, y otra igual a 0.65 con resistencias más bajas.

Se distinguen dos líneas de ensayo diferentes. En la primera de ellas (Fase Vigas) se fabrican dos vigas gemelas para cada tipo de hormigón sobre las que se realizan los ensayos bajo cargas incrementales y bajo carga sostenida durante 1000 días. Estos permiten conocer la respuesta estructural a flexión, instantánea y diferida, de los hormigones reciclados.

Previamente se llevan a cabo los ensayos de caracterización del hormigón para determinar resistencias a compresión y tracción, módulo de deformación longitudinal y transversal, diagrama tensión – deformación, retracción y fluencia.

Por último, la Fase Adherencia aborda el estudio del comportamiento adherente de los hormigones reciclados mediante ensayos de arrancamiento tipo pull-out a diferentes edades comprendidas entre 7 y 365 días.

Con los resultados obtenidos se comprueba la bondad de las expresiones normativas para los hormigones reciclados, proponiéndose coeficientes correctores dependientes del porcentaje de árido reciclado cuando resulta necesario.

## ABSTRACT

### ***Effect of long-term deformations in structural flexural performance and bond behaviour analysis of recycled concrete***

This work is focused on the study of structural flexural performance and bond behaviour analysis of recycled concrete with different recycled coarse replacements, 20%, 50% and 100%. Therefore, two concrete series were designed, one with a water to cement ratio (w/c) of 0.50 (which allows good performance concrete) and the other one with a w/c ratio of 0.65 (with lower strengths).

The research was developed into two phases. In the first one, Beams Phase, two twin (series) reinforced beams were made with each kind of concrete. One of the series was tested under static loading and the other under sustained load for 1000 days. This shows the structural short and long-term flexural performance of recycled concretes beams.

Previously, the concretes were characterized in both fresh and hardened state: consistency, compressive and splitting strength, longitudinal and transversal modulus of elasticity, stress-strain curve, shrinkage and creep were determined.

Finally, the second phase was developed. It deals with the bond behaviour study of recycled concrete as a result of pull-out tests at different ages, from 7 to 365 days.

The results allow you to check the suitability of including correcting coefficients into the standards design expressions of structural concrete when the recycled coarse aggregate is used.

## RESUMO

### ***Efecto das deformacións diferidas sobre a resposta estrutural a flexión e análise do comportamento adherente do formigón reciclado***

Este traballo centrase no estudio dos formigóns reciclados para uso estrutural, con substitucións de árido grueso natural por reciclado do 20%, 50% y 100%. Para eso, fabricanse dua series de formigón, unha con relación a/c igual a 0.50 que conferirá aos formigóns resistencias elevadas, e outra igual a 0.65 con resistencias máis baixas.

Distinguense duas líneas de ensaio diferentes. Na primeira delas, Fase Vigas, fabricanse duas vigas xemelgas para cada tipo de formigón sobre as que se realizan os ensaios baixo cargas incrementales e baixo carga sostida durante 1000 días. Estos permiten coñecer a resposta estrutural a flexión, instantánea e diferida, dos formigóns reciclados.

Previamente, lévanse a cabo os ensaios de caracterización do formigón para determinar as resistencias a compresión e tracción, o módulo de deformación lonxitudinal e transversal, o diagrama tensión – deformación, a retracción e a fluencia.

Por último, a Fase Adherencia aborda o estudio do comportamento adherente dos formigóns reciclados mediante ensaios de arrancamento tipo pull-out a diferentes edades, de 7 a 365 días.

Cos resultados obtidos compróbase a bondade das expresións normativas para os formigóns reciclados, propóndose coeficientes correctores dependentes do árido reciclado cando sexa necesario.

---

# ÍNDICE DE CONTENIDO

---

I.	INTRODUCCIÓN	1
1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS GENERALES	3
3	RESUMEN	3
II.	ESTADO DEL CONOCIMIENTO	7
1	INTRODUCCIÓN	7
2	ARIDOS PARA HORMIGONES RECICLADOS	7
2.1	Definición Árido reciclado	8
2.2	Propiedades de los áridos reciclados	9
3	FABRICACIÓN DE LOS HORMIGONES RECICLADOS	10
4	PROPIEDADES DE LOS HORMIGONES RECICLADOS	11
4.1	Propiedades físicas	11
4.2	Resistencia a compresión	12
4.3	Resistencia a tracción	15
4.4	Módulo de deformación	16
4.5	Diagrama tensión – deformación	18
4.6	Fatiga	18
4.7	Daño y cansancio	19
4.8	Retracción	20
4.9	Fluencia	25
5	COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL	31
5.1	Flexión	31
5.2	Cortante	35
6	ADHERENCIA CON ARMADURAS PASIVAS	36
6.1	Generalidades	36
6.2	Ensayos de adherencia	40
6.3	Modos de fallo	43
6.4	Adherencia en el hormigón reciclado	44

## ÍNDICE DE CONTENIDO

---

7	DURABILIDAD	46
8	MARCO NORMATIVO DEL HORMIGÓN RECICLADO	47
8.1	Planificación y objetivos en la gestión de residuos	47
8.2	Especificaciones técnicas	48
9	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	52
III.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	55
1	INTRODUCCIÓN	55
2	HORMIGONES DE ESTUDIO	56
2.1	Materiales empleados	56
2.2	Dosificaciones de los hormigones	59
3	PROCESO DE AMASADO	61
3.1	Pre-saturación del árido reciclado	61
3.2	Preparación de los materiales	62
3.3	Secuencia de amasado	63
4	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN	64
4.1	Fabricación y curado	64
4.2	Ensayos en fresco. Densidad y consistencia	65
4.3	Ensayos en estado endurecido	65
5	ENSAYOS ESTRUCTURALES A FLEXIÓN	68
5.1	Geometría y armado de las vigas	68
5.2	Fabricación y curado	70
5.3	Instrumentación	71
5.4	Procedimiento de ensayo bajo cargas incrementales	72
5.5	Procedimiento de ensayo bajo cargas sostenidas	75
6	ENSAYOS DE ADHERENCIA	80
6.1	Fabricación y curado	80
6.2	Instrumentación	81
6.3	Procedimiento de ensayo	81
IV.	CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN	85
1	INTRODUCCIÓN	85
2	TEMPERATURA Y HUMEDAD	85
3	PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO	86
3.1	Consistencia	86
3.2	Densidad	86
4	PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO	87
4.1	Propiedades físicas. Densidad y absorción	87



4.2	Resistencia a compresión	89
4.3	Resistencia a tracción	91
4.4	Módulo de deformación elástico longitudinal y transversal	96
4.5	Diagrama tensión-deformación	101
4.6	Retracción	108
4.7	Fluencia	116
5	CONSIDERACIONES FINALES SOBRE LOS HORMIGONES ESTUDIADOS	129
5.1	Propiedades físicas	129
5.2	Resistencias mecánicas y módulo de deformación	130
5.3	Diagrama tensión - deformación	130
5.4	Retracción	131
5.5	Fluencia	131
V.	FLEXIÓN BAJO CARGAS INCREMENTALES	133
1	INTRODUCCIÓN	133
2	NOMENCLATURA DE LA INSTRUMENTACIÓN	134
3	COMPORTAMIENTO BAJO CARGAS INCREMENTALES	135
3.1	Análisis seccional	135
3.2	Análisis de solicitaciones	142
3.2	Análisis de fisuración y flechas	145
4	CONSIDERACIONES FINALES	155
VI.	FLEXIÓN BAJO CARGA SOSTENIDA	157
1	INTRODUCCIÓN	157
2	NOMENCLATURA DE LA INSTRUMENTACIÓN	158
3	COMPORTAMIENTO BAJO CARGA SOSTENIDA	160
3.1	Análisis seccional	160
3.2	Análisis de solicitaciones	165
3.3	Análisis de deformaciones	166
3.4	Análisis de flechas	170
4	CONSIDERACIONES FINALES	180
4.1	Análisis de solicitaciones	180
4.2	Análisis de deformaciones	180
4.3	Análisis de flechas	180
VII.	COMPORTAMIENTO ADHERENTE	183
1	INTRODUCCIÓN	183
2	CARACTERIZACION DEL HORMIGON	185
2.1	Consistencia.	185

## ÍNDICE DE CONTENIDO

---

2.2	Resistencia a compresión	185
3	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PULL-OUT	187
3.1	Curvas carga – deslizamiento (Q –s).	187
3.2	Cargas y Tensiones de adherencia	190
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	191
4.1	Modo de fallo	191
4.2	Tensión de adherencia máxima y media.	191
4.3	Tensión de adherencia normalizada.	192
4.4	Forma de la curva	193
5	ESTIMACIÓN DE LA RESPUESTA ADHERENTE DEL HORMIGÓN RECICLADO	196
5.1	Estimación de la tensión de adherencia última	196
5.2	Estimación de la forma de la curva Tensión de adherencia – deslizamiento.	200
6	CONSIDERACIONES FINALES	202
VIII.	CONCLUSIONES/ CONCLUSIONS	205
1	CONCLUSIONES/ CONCLUSIONS	205
1.1	Carcaterización del hormigón/ Concrete characterization	205
1.2	Análisis bajo cargas incrementales/ Short-term analysis	210
1.3	Análisis bajo cargas sostenidas/ Long-term analysis	212
1.4	Comportamiento adherente / Bond behaviour	214
IX.	BIBLIOGRAFÍA	217

---

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura I-1. Diagrama del Ciclo de la Construcción [AGUA03] .....	2
Figura II-1. Contenedor de residuos de construcción .....	8
Figura II-2. Gestión de residuos .....	8
Figura II-3. Rülh, 1997 [RÜLH92]      Figura II-4. Sánchez de Juan, 2004 [SANC05] .....	10
Figura II-5. Relación entre la densidad de los áridos y la densidad del hormigón [BRIT10; MAS12] .....	12
Figura II-6. Relación entre la absorción del hormigón reciclado y el contenido y la densidad del árido reciclado [BRIT10; KWAN12] .....	12
Figura II-7. Relación entre la densidad del hormigón y la resistencia a compresión [XIAO05; BRIT10] .....	12
Figura II-8. Resistencia a compresión de hormigones reciclados [LIX08] .....	13
Figura II-9. Relación entre la absorción del árido y la resistencia a compresión del hormigón [BRIT10] ...	14
Figura II-10. Evolución de la resistencia a compresión de los hormigones reciclados [KWAN12; EVAN07]	14
Figura II-11. Resistencia a tracción en hormigones reciclados [LIX08; PERE12] .....	15
Figura II-12. Valores del módulo de elasticidad para diferentes cantidades de árido reciclado [ETXE07] .	16
Figura II-13. Relación de la densidad del hormigón con el módulo de deformación [BRIT10] .....	17
Figura II-14. Diagrama Tensión-deformación [GONZ11] .....	18
Figura II-15. Daño a tensión máxima [GONZ11] .....	19
Figura II-16. Clasificación de los tipos de retracción [HOLT05] .....	22
Figura II-17. Deformación de retracción en hormigones reciclados [DOMI10] .....	23
Figura II-18. Retracción en hormigones reciclados (RC) y de control (CC) [MANZ13] .....	24
Figura II-19. Evolución temporal de las propiedades del hormigón [NEVI95] .....	25
Figura II-20. Efecto conjunto de fluencia y retracción [GILB11] .....	29
Figura II-21. Fluencia en hormigones reciclados [DOMI10; MANZ13] .....	30
Figura II-22. Componentes de la deformación del hormigón [GILB11] .....	32
Figura II-23. Ensayo a flexión [YAGI93] .....	33
Figura II-24. Fisuración para una flecha de 20mm [YAGI93] .....	33
Figura II-25. Esquema de ensayo [SATO07] .....	34
Figura II-26. Resultados del ensayo de Sato [SATO07] .....	34
Figura II-27. Esquema de ensayo para vigas bajo carga sostenida [SERR94] .....	35
Figura II-28. Relación cortante de plastificación - cortante de fisuración en función de la cuantía de armadura transversal (vano S6) y del tipo de material [GONZ02] .....	36
Figura II-29. Relación carga – desplazamiento obtenida por [CORI09] .....	38
Figura II-30. Tensión adherente para diferentes recubrimientos [MOLI04] .....	38
Figura II-31. Dirección de hormigonado [SCHU04] .....	39
Figura II-32. Curvas tensión adherente - deslizamiento para cargas estáticas y dinámicas [SOLO10] .....	39
Figura II-33. Ensayo pull-out, presentado en dos variantes, en el que se reflejan las tensiones de adherencia variables en función de la disposición del ensayo .....	40
Figura II-34. Curvas carga - deslizamiento de ensayos pull-out [KHAN08; XIAO07] .....	41

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

<i>Figura II-35. Esquema del ensayo beam-test.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura II-36. Esquema de ensayo tipo transferencia [CAIRO3] .....</i>	<i>42</i>
<i>Figura II-37. Esquema de ensayo Schmidt-Thro [YAGI93] .....</i>	<i>42</i>
<i>Figura II-38. Ensayos modificados de adherencia [HAKA12; KIM12].....</i>	<i>43</i>
<i>Figura II-39. Fallo por pull-out [CAIRO3; KHAN08].....</i>	<i>43</i>
<i>Figura II-40. Fallo por splitting [CAIRO3; HAKA12].....</i>	<i>43</i>
<i>Figura II-41. Comportamiento adherente según el Código Modelo 2010 [MC-10] .....</i>	<i>43</i>
<i>Figura II-42. Tensiones adherentes normalizadas [BUTL11; KIM12] .....</i>	<i>44</i>
<i>Figura II-43. Tensión adherente [XIAO07; CORIO9].....</i>	<i>45</i>
<i>Figura II-44. Tensiones adherentes [AJDU02].....</i>	<i>45</i>
<i>Figura II-45. Relación carga – deslizamiento [CORIO9].....</i>	<i>45</i>
<i>Figura II-46. Orden de prioridad en la aplicación de legislación y la política de residuos en la UE .....</i>	<i>47</i>
<i>Figura III-1. Áridos empleados. Arena, gravilla y grava naturales y árido grueso reciclado .....</i>	<i>57</i>
<i>Figura III-2. Curvas granulométricas de los áridos .....</i>	<i>58</i>
<i>Figura III-3. Composición del árido reciclado.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura III-4. Obtención de los no-flotantes en el ensayo de composición de los áridos reciclados.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura III-5. Armaduras para la Fase Vigas y barras corrugadas para la Fase Adherencia .....</i>	<i>59</i>
<i>Figura III-6. Nomenclatura de los hormigones de estudio.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura III-7. Asiento en cono de Abrams .....</i>	<i>61</i>
<i>Figura III-8. Pre-saturación del árido reciclado.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura III-9. Preparación del material.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura III-10. Básculas empleadas .....</i>	<i>62</i>
<i>Figura III-11. Central de amasado .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura III-12. Proceso de amasado .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura III-13. Fabricación de las probetas.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura III-14. Curado de las probetas en la Fase Vigas .....</i>	<i>64</i>
<i>Figura III-15. Probetas de la Fase Vigas almacenadas en el laboratorio hasta su ensayo .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura III-16. Curado de las probetas en la Fase Adherencia.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura III-17. Medida de la consistencia mediante el cono de Abrams .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura III-18. Probetas para el ensayo de densidad y absorción .....</i>	<i>66</i>
<i>Figura III-19. Ensayos de caracterización de las probetas .....</i>	<i>66</i>
<i>Figura III-20. Ensayo de retracción. Probetas y galgas.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura III-21. Ensayo de fluencia. Probetas y galgas .....</i>	<i>68</i>
<i>Figura III-22. Armadura de las vigas de la serie H50 .....</i>	<i>69</i>
<i>Figura III-23. Armadura de las vigas de la serie H65 .....</i>	<i>69</i>
<i>Figura III-24. Armadura de las vigas.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura III-25. Montaje del encofrado de las vigas y colocación de la armadura .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura III-26. Fabricación de las vigas: vertido, compactación y enrase del hormigón .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura III-27. Vigas almacenadas en laboratorio hasta ensayo .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura III-28. Colocación y protección de las galgas adheridas a las armaduras .....</i>	<i>71</i>
<i>Figura III-29. Geometría de ensayo a flexión bajo cargas incrementales (mm) .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura III-30. Ensayo bajo cargas incrementales .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura III-31. Leyes de esfuerzo en ensayo a flexión (sin considerar el peso propio).....</i>	<i>73</i>
<i>Figura III-32. Disposición de las galgas en la armadura para las vigas H50 (lado Este en la imagen superior y Oeste en la inferior). Fase Vigas I .....</i>	<i>73</i>
<i>Figura III-33. Disposición de las galgas en la armadura para las vigas H65 (lado Este en la imagen superior y Oeste en la inferior). Fase Vigas I .....</i>	<i>73</i>
<i>Figura III-34. Disposición de las galgas de hormigón en la sección central de la viga. Fase Vigas I.....</i>	<i>74</i>

<i>Figura III-35. Disposición de transductores de desplazamiento (cotas en mm). Fase Vigas I.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura III-36. Transductores de desplazamiento durante los ensayos. Fase Vigas I.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura III-37. Esquema de ensayo bajo cargas incrementales.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura III-38. Marcado de fisuras durante el ensayo bajo cargas incrementales.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura III-39. Esquema del ensayo bajo carga sostenida y probetas de fluencia dentro del bastidor.Fase Vigas II.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura III-40. Distribución en planta del sistema de ensayo bajo carga sostenida. Fase Vigas II.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura III-41. Sistema de carga en el ensayo bajo carga sostenida. Fase Vigas II.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura III-42. Galgas de hormigón y discos metálicos en el hormigón. Fase Vigas II.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura III-43. Transductor de desplazamiento y célula de carga. Fase Vigas II.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura III-44. Esquema general de la instrumentación. Fase Vigas II.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura III-45. Fabricación y curado de probetas para ensayo pull-out. Fase Adherencia.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura III-46. Geometría de ensayo pull-out para probetas de 10x10x10 cm y barra <math>\phi 10</math> mm.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura III-47. Sistema de ensayo pull out.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura IV-1. Condiciones ambientales del laboratorio. Humedad y temperatura.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura IV-2. Densidad y absorción de los hormigones H50 a 28 días. Fase Vigas.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura IV-3. Densidad y absorción de los hormigones H65 a 28 días. Fase Vigas.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura IV-4. Reducción de la densidad del hormigón endurecido vs. contenido de árido reciclado.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura IV-5. Incremento de la capacidad de absorción vs. contenido de árido reciclado.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura IV-6. Relación entre la densidad endurecido seco y la absorción.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura IV-7. Resistencia a compresión. Fase Vigas.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura IV-8. Reducción de la resistencia a compresión vs. Contenido de árido reciclado.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura IV-9. Relación entre la resistencia a compresión y la densidad endurecido seco.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura IV-10. Relación entre la resistencia a compresión y la absorción.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura IV-11. Resistencia a tracción indirecta. Fase Vigas.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura IV-12. Reducción de la resistencia a tracción indirecta vs.contenido de árido reciclado.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura IV-13. Resistencia a tracción. Estimación normativa, propuestas empíricas y resultados experimentales. H50.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura IV-14. Resistencia a tracción. Estimación normativa, propuestas empíricas y resultados experimentales. H65.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura IV-15. Ajuste del coeficiente corrector para la predicción de la resistencia a tracción.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura IV-16. Resistencia a tracción. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales..</i>	<i>95</i>
<i>Figura IV-17. Módulo de deformación longitudinal y transversal. Fase Vigas.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura IV-18. Reducción del módulo de deformación longitudinal vs. contenido de árido reciclado.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura IV-19. Módulo de deformación longitudinal. Estimación normativa y resultados experimentales. H50.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura IV-20. Módulo de deformación longitudinal. Estimación normativa y resultados experimentales. H65.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura IV-21. Módulo de deformación longitudinal. Estimación con propuesta de autores y resultados experimentales. H50.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura IV-22. Módulo de deformación longitudinal H65. Estimación con propuesta de autores y resultados experimentales. H65.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura IV-23. Ajuste del coeficiente corrector para la predicción del módulo de deformación longitudinal.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura IV-24. Módulo de deformación longitudinal. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura IV-25. Diagrama Tensión - deformación en control por carga a 28 y 42 días. Fase Vigas.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura IV-26. Diagrama tensión - deformación en control por desplazamiento a 28 días. Fase Vigas.....</i>	<i>103</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

<i>Figura IV-27. Diagrama tensión - deformación en control por desplazamiento a 42 días. Fase Vigas ....</i>	<i>104</i>
<i>Figura IV-28. Incremento de la deformación de pico y última vs. contenido de árido reciclado .....</i>	<i>105</i>
<i>Figura IV-30. Deformación de pico y última de la Serie H65. Estimación normativa y resultados experimentales .....</i>	<i>107</i>
<i>Figura IV-31. Ajuste del coeficiente corrector para la predicción de la deformación de pico y última .....</i>	<i>107</i>
<i>Figura IV-32. Deformación de pico y última. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales .....</i>	<i>108</i>
<i>Figura IV-33. Ensayo de retracción. Probetas y sistema de adquisición de datos .....</i>	<i>108</i>
<i>Figura IV-34. Evolución de la retracción libre en los hormigones. Serie H50 .....</i>	<i>109</i>
<i>Figura IV-35. Evolución de la retracción libre en los hormigones. Serie H65 .....</i>	<i>110</i>
<i>Figura IV-36. Desarrollo de la retracción en los primeros 90 días respecto a 1000 días. Serie H50 .....</i>	<i>111</i>
<i>Figura IV-37. Desarrollo de la retracción en los primeros 90 días respecto a 1000 días. Serie H65 .....</i>	<i>111</i>
<i>Figura IV-38. Incremento de la retracción vs. contenido de árido reciclado .....</i>	<i>111</i>
<i>Figura IV-39. Evolución de la retracción. Predicción normativa y resultados experimentales. H50 .....</i>	<i>113</i>
<i>Figura IV-40. Evolución de la retracción. Predicción normativa y resultados experimentales. H65 .....</i>	<i>114</i>
<i>Figura IV-41. Ajuste del coeficiente corrector para la predicción de la deformación de retracción .....</i>	<i>115</i>
<i>Figura IV-42. Retracción. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales. H50 .....</i>	<i>115</i>
<i>Figura IV-43. Retracción. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales. H65 .....</i>	<i>116</i>
<i>Figura IV-44. Retracción a 1000 días. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales .....</i>	<i>116</i>
<i>Figura IV-45. Deformación total - edad. Serie H50 .....</i>	<i>118</i>
<i>Figura IV-46. Nivel tensional - edad. Serie H50 .....</i>	<i>118</i>
<i>Figura IV-47. Nivel tensional - deformación. Serie H50 .....</i>	<i>118</i>
<i>Figura IV-48. Deformación total- edad. Serie H65 .....</i>	<i>119</i>
<i>Figura IV-49. Nivel tensional - edad. Serie H65 .....</i>	<i>119</i>
<i>Figura IV-50. Nivel tensional - deformación. Serie H65 .....</i>	<i>119</i>
<i>Figura IV-51. Evolución de la deformación de fluencia. Serie H50 .....</i>	<i>120</i>
<i>Figura IV-52. Evolución de la deformación de fluencia. Serie H65 .....</i>	<i>121</i>
<i>Figura IV-53. Fluencia unitaria. Serie H50 .....</i>	<i>122</i>
<i>Figura IV-54. Fluencia unitaria. Serie H65 .....</i>	<i>122</i>
<i>Figura IV-55. Incremento de la fluencia unitaria vs. Contenido de árido reciclado .....</i>	<i>122</i>
<i>Figura IV-56. Coeficiente de fluencia. H50 .....</i>	<i>123</i>
<i>Figura IV-57. Coeficiente de fluencia. H65 .....</i>	<i>124</i>
<i>Figura IV-58. Coeficiente de fluencia H50. Predicción normativa y resultados experimentales .....</i>	<i>126</i>
<i>Figura IV-59. Coeficiente de fluencia H65. Predicción normativa y resultados experimentales .....</i>	<i>127</i>
<i>Figura IV-60. Ajuste del coeficiente corrector para la predicción del coeficiente de fluencia .....</i>	<i>128</i>
<i>Figura IV-61. Coeficiente de fluencia. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales. H50 .....</i>	<i>128</i>
<i>Figura IV-62. Coeficiente de fluencia. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales. H65 .....</i>	<i>129</i>
<i>Figura IV-63. Coeficiente de fluencia a 1000 días. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales .....</i>	<i>129</i>
 <i>Figura V-1. Sección de las vigas .....</i>	 <i>136</i>
<i>Figura V-2. Deformación en la armadura. H50 .....</i>	<i>139</i>
<i>Figura V-3. Deformación en la armadura. H65 .....</i>	<i>140</i>
<i>Figura V-4. Deformación en la sección central, hormigón y acero. H50 .....</i>	<i>141</i>
<i>Figura V-5. Deformación en la sección central, hormigón y acero. H65 .....</i>	<i>142</i>
<i>Figura V-6. Diagramas M-C en la sección central. H50 .....</i>	<i>143</i>

<i>Figura V-7. Diagramas M-C en la sección central. H65 .....</i>	<i>143</i>
<i>Figura V-8. Momentos flectores <math>M_{fis}</math>, <math>M_{L350}</math>, <math>M_{plast}</math> y <math>M_{m\acute{a}x}</math> .....</i>	<i>145</i>
<i>Figura V-9. Momentos de fisuración. Estimación teórica y resultados experimentales .....</i>	<i>145</i>
<i>Figura V-10. Momentos de plastificación. Estimación teórica y resultados experimentales.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura V-11. Momento máximo. Estimación teórica y resultados experimentales .....</i>	<i>146</i>
<i>Figura V-12. Ajuste del coeficiente corrector para la predicción de los momentos <math>M_{fis}</math>, <math>M_{plast}</math> y <math>M_{m\acute{a}x}</math>.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura V-13. Marcado de fisuras .....</i>	<i>148</i>
<i>Figura V-14. Mapa de fisuras. H50-0.....</i>	<i>148</i>
<i>Figura V-15. Mapa de fisuras. H50-20.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura V-16. Mapa de fisuras. H50-50.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura V-17. Mapa de fisuras. H50-100.....</i>	<i>150</i>
<i>Figura V-18. Mapa de fisuras. H65-0.....</i>	<i>150</i>
<i>Figura V-19. Mapa de fisuras. H65-20.....</i>	<i>151</i>
<i>Figura V-20. Mapa de fisuras. H65-50.....</i>	<i>151</i>
<i>Figura V-21. Mapa de fisuras. H65-100.....</i>	<i>152</i>
<i>Figura V-22. Flechas en el ensayo bajo cargas incrementales.....</i>	<i>152</i>
<i>Figura V-23. Diagramas Momento-flecha. H50.....</i>	<i>153</i>
<i>Figura V-24. Diagramas Momento-flecha. H65.....</i>	<i>154</i>
<i>Figura V-25. Diagramas Momento-flecha en la sección central de la serie H50 .....</i>	<i>155</i>
<i>Figura V-26. Diagramas Momento-flecha en la sección central de la serie H65 .....</i>	<i>155</i>
<i>Figura V-27. Flechas asociadas a <math>M_{fis}</math>, <math>M_{serv}</math>, <math>M_{plast}</math> y <math>M_{m\acute{a}x}</math>.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura V-28. Flecha de servicio. Estimación teórica y resultados experimentales.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura V-29. Ajuste del coeficiente corrector para la predicción de la flecha asociada al momento de servicio.....</i>	<i>157</i>
<i>Figura VI-1. Células de carga superior (tirante) e inferior (bastidor).....</i>	<i>159</i>
<i>Figura VI-2. Transductor de desplazamiento en la sección central de la viga .....</i>	<i>159</i>
<i>Figura VI-3. Deformación en la armadura bajo carga sostenida. H50 .....</i>	<i>161</i>
<i>Figura VI-4. Deformación en la armadura bajo carga sostenida. H65 .....</i>	<i>162</i>
<i>Figura VI-5. Deformación en la sección central, hormigón y acero, bajo carga sostenida. H50 .....</i>	<i>163</i>
<i>Figura VI-6. Deformación en la sección central, hormigón y acero, bajo carga sostenida. H65 .....</i>	<i>164</i>
<i>Figura VI-7. Diagramas M-C en la sección central bajo carga sostenida. H50 .....</i>	<i>165</i>
<i>Figura VI-8 Diagramas M-C en la sección central bajo carga sostenida. H65 .....</i>	<i>165</i>
<i>Figura VI-9. Momentos de fisuración a 28 y 42 días.....</i>	<i>166</i>
<i>Figura VI-10. Deformación total– tiempo. H50 .....</i>	<i>166</i>
<i>Figura VI-11. Deformación total – tiempo.H65 .....</i>	<i>167</i>
<i>Figura VI-12. Deformación diferida unitaria–tiempo en probetas y cabeza de compresión de la viga. H50 .....</i>	<i>168</i>
<i>Figura VI-13. Deformación diferida unitaria–tiempo en probetas y cabeza de compresión de la viga. H65 .....</i>	<i>168</i>
<i>Figura VI-14. Deformación diferida – tiempo y diferida unitaria – tiempo .....</i>	<i>169</i>
<i>Figura VI-15. Flecha total - tiempo. H50.....</i>	<i>170</i>
<i>Figura VI-16. Flecha total - tiempo. H65.....</i>	<i>170</i>
<i>Figura VI-17. Diagrama momento – flecha. H50.....</i>	<i>171</i>
<i>Figura VI-18. Diagrama momento – flecha. H65.....</i>	<i>171</i>
<i>Figura VI-19. Relación “flecha diferida/ flecha instantánea” - tiempo. H50 .....</i>	<i>172</i>
<i>Figura VI-20. Relación “flecha diferida/ flecha instantánea” - tiempo. H65 .....</i>	<i>173</i>
<i>Figura VI-21. Flecha diferida –tiempo y flecha diferida unitaria - tiempo.....</i>	<i>174</i>
<i>Figura VI-22. Evolución de la flecha diferida. Predicción normativa y resultados experimentales. H50 ..</i>	<i>176</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura VI-23. Evolución de la flecha diferida. Predicción normativa y resultados experimentales. H65 ..	177
Figura VI-24. Ajuste del coeficiente corrector para predicción de flechas diferidas de acuerdo a EHE y ACI .....	178
Figura VI-25. Ajuste del coeficiente corrector para predicción de flechas diferidas de acuerdo al EC-2 ..	178
Figura VI-26. Flechas diferidas. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales (EC y EHE). .....	179
Figura VI-27. Flechas diferidas a 1000 días. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales (EC) .....	180
Figura VII-1. Fisuras longitudinales (splitting cracks) .....	184
Figura VII-2. Resistencia a compresión en probeta cilíndrica. Fase Adherencia .....	185
Figura VII-3. Resistencia a compresión a 3, 7, 28, 90 y 365 días. H50 (probeta cúbica). Fase Adherencia .....	186
Figura VII-4. Resistencia a compresión a 3, 7, 28, 90 y 365 días. H65 (probeta cúbica). Fase Adherencia .....	186
Figura VII-5. Curvas carga-deslizamiento. H50.....	188
Figura VII-6. Curvas carga-deslizamiento. H65.....	189
Figura VII-7. Fallo por deslizamiento (pull-out) .....	191
Figura VII-8. Tensiones de adherencia media y máxima a 7, 28, 90 y 365 días. H50 .....	191
Figura VII-9. Tensiones de adherencia media y máxima a 7, 28, 90 y 365 días H65 .....	192
Figura VII-10. Tensión de adherencia máxima y media normalizadas a 28 días .....	193
Figura VII-11. Curvas tensión de adherencia unitaria-deslizamiento a distintas edades. H50.....	194
Figura VII-12. Curvas tensión de adherencia unitaria-deslizamiento a distintas edades. H65.....	195
Figura VII-13. Curva tensión de adherencia unitaria-deslizamiento promedio .....	196
Figura VII-14. Estimación de la tensión de adherencia máxima. H50 .....	198
Figura VII-15. Estimación de la tensión de adherencia máxima. H65 .....	198
Figura VII-16. Ajuste del coeficiente corrector para la predicción de la de la tensión de adherencia máxima.....	199
Figura VII-17. Tensiones de adherencia máximas. Predicción con coeficiente corrector y resultados experimentales .....	199
Figura VII-18. Curvas tensión de adherencia – deslizamiento experimentales y teóricas. H50.....	200
Figura VII-19. Curvas tensión de adherencia – deslizamiento experimentales y teóricas. H65.....	200
Figura VII-20. Curvas tensión de adherencia – deslizamiento experimentales y teóricas corregidas. H50 .....	201
Figura VII-21. Curvas tensión de adherencia – deslizamiento experimentales y teóricas corregidas. H65 .....	202



---

# ÍNDICE DE TABLAS

---

<i>Tabla II-1. Expresiones empíricas para la predicción de la resistencia a tracción en hormigones reciclados.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla II-3. Predicción del módulo de elasticidad en hormigones reciclados.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla II-4. Deformación por retracción en los hormigones reciclados .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla II-5. Deformación por fluencia en los hormigones reciclados. Fluencia y fluencia unitaria .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla II-6. Tipos de deformación en el hormigón [DUAR10] .....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla II-6. Tensión de adherencia en MPa para distintas temperaturas de curado [SERNO2] .....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla II-7. Limitaciones normativa italiana .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla III-1. Plan de ensayos .....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla III-2. Características del cemento CEM-I 52.5 N/SR .....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla III-3. Caracterización de los áridos .....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla III-4. Composición de los áridos reciclados (UNE-EN 933-11) .....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla III-5. Dosificaciones para 1 m<sup>3</sup> de hormigón .....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla III-6. Secuencia de amasado .....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla III-7. Plan de ensayos para la caracterización del hormigón endurecido .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla III-8. Cargas consideradas en el dimensionamiento de la viga .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla III-9. Parámetros de diseño y geometría de las vigas .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla IV-1. Consistencia obtenida mediante asiento en cono de Abrams. Fase Vigas .....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla IV-2. Desviaciones típicas de la resistencia a compresión obtenida como media de tres probetas .....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla IV-3. Expresiones normativas para la estimación de la resistencia a tracción .....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla IV-4. Resistencia a tracción. Ratio “tracción experimental/ tracción teórica” .....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla IV-5. Expresiones empíricas propuestas por diversos autores para la predicción de la resistencia a tracción.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla IV-6. Expresiones normativas para estimación del módulo de deformación longitudinal .....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla IV-7. Módulo de deformación longitudinal. Ratio “módulo experimental / módulo teórico” .....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla IV-8. Expresiones empíricas para la predicción del módulo de deformación longitudinal .....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla IV-9. Deformación de pico (<math>\epsilon_{co}</math>) y última (<math>\epsilon_{cu}</math>). Fase Vigas.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabla IV-10. Expresiones normativas para estimación de la deformación de pico y última .....</i>	<i>106</i>
<i>Tabla IV-11. Deformación de pico. Ratio “deformación experimental/ deformación teórica” .....</i>	<i>106</i>
<i>Tabla IV-12. Deformación última. Ratio “deformación experimental/ deformación teórica” .....</i>	<i>106</i>
<i>Tabla IV-13. Retracción a diferentes edades, 7, 28, 90, 180, 365 y 1000 días.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla IV-14. Retracción a 1000 días. Ratio “retracción experimental/ retracción teórica” .....</i>	<i>112</i>
<i>Tabla IV-15. Estado tensional y deformacional en (t-t<sub>0</sub>)=1000 días .....</i>	<i>120</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla IV-16. Coeficiente de fluencia a 1000 días. Ratios “coeficiente $\phi$ experimental/ coeficiente $\phi$ teórico” .....	125
Tabla IV-17. Factores de corrección propuestos para la estimación de la resistencia a tracción y el módulo de deformación en hormigones reciclados.....	130
Tabla IV-18. Factores de corrección propuestos para estimación de la deformación de pico y última en hormigones reciclados.....	131
Tabla IV-19. Factor de corrección propuesto para la estimación de la deformación de retracción en hormigones reciclados.....	131
Tabla IV-20. Factor de corrección propuesto para la estimación del coeficiente de fluencia en hormigones reciclados.....	132
Tabla V-1. Instrumentación en el acero (galgas).....	136
Tabla V-2. Instrumentación en el hormigón (galgas) y en las vigas (transductores).....	137
Tabla V-3. Momentos $M_{fis}$ , $M_{L350}$ , $M_{plast}$ y $M_{máx}$ (kNm) y ratios .....	144
Tabla V-4. Momento de fisuración. Ratios “ $M_{fis}$ experimental/ $M_{fis}$ teórico”.....	146
Tabla V-5. Momento de plastificación. Ratios “ $M_{plast}$ experimental / $M_{plast}$ teórico”.....	147
Tabla V-6. Momento máximo teórico (kNm) y ratios “ $M_{máx}$ experimental / $M_{máx}$ teórico”.....	147
Tabla V-7. Flechas asociadas a los momentos $M_{fis}$ , $M_{serv}$ , $M_{plast}$ y $M_{máx}$ (mm) .....	155
Tabla V-8. Ratios “ $f_{Mserv}$ teórica / $f_{Mserv}$ experimental” .....	157
Tabla VI-1. Nivel tensional y tensión en la fibra más comprimida de las vigas y en las probetas .....	158
Tabla VI-2. Instrumentación en la armadura de las vigas .....	158
Tabla VI-3. Instrumentación en el hormigón y en las probetas de fluencia (galgas).....	159
Tabla VI-4. Momentos de fisuración, $M_{fis}$ , y correspondiente a la carga aplicada, $M_Q$ .....	165
Tabla VI-5. Deformación total, instantánea y diferida a 1000 días. Tensión y nivel tensional bajo carga sostenida. ....	167
Tabla VI-6. Flecha total, instantánea y diferida a 1000 días y momento asociado a la carga sostenida. ....	171
Tabla VI-7. Flechas asociadas los momentos $M_{fis}$ , $M_Q$ (mm) .....	171
Tabla VI-8. Ratios “flecha diferida experimental/ flecha diferida teórica” a 1000 días .....	175
Tabla VII-1. Consistencia obtenida mediante asiento en cono de Abrams. Fase Adherencia .....	185
Tabla VII-2. Relación entre la resistencia a compresión a distintas edades y a 28 días. o .....	187
Tabla VII-3. Tensiones de adherencia (MPa) a 7, 28, 90 y 365 días.....	190
Tabla VII-4. Deslizamiento para las tensiones de adherencia unitarias $\tau/\tau_{max} = 0.75$ y $\tau/\tau_{max} = 0.25$ .....	193
Tabla VII-5. Disminución porcentual de la tensión de adherencia unitaria respecto al hormigón convencional.....	196
Tabla VII-6. Expresiones que estiman la tensión de adherencia .....	197
Tabla VII-7. Ratio “tensión máxima experimental/ tensión máxima estimada” .....	198
Tabla VIII-1. Factores de corrección propuestos para la estimación de las propiedades en hormigones .....	210

---

# NOTACIÓN

---

$a/c$	Relación agua-cemento
$A_c$	Area de la sección transversal
$b$	ancho de la sección transversal de la viga
$c$	Recubrimiento del hormigón
$E_c$	Módulo de deformación longitudinal del hormigón
$f_c$	Resistencia a compresión del hormigón
$f_{ck}$	Resistencia a compresión característica del hormigón
$f_{cm}$	Resistencia a compresión media del hormigón
$f_{ct}$	Resistencia a tracción del hormigón
$f_{ctm}$	Resistencia a tracción media del hormigón
$f_{cu}$	Resistencia a compresión del hormigón sobre probeta cúbica
$f_{c,cil}$	Resistencia a compresión del hormigón sobre probeta cilíndrica
$f_{c,cub}$	Resistencia a compresión del hormigón sobre probeta cúbica
$f_{dif}$	flecha diferida en la sección central de la viga
$f_{Mfis}$	flecha en la sección central de la viga asociada al momento de fisuración
$f_{Mmáx}$	flecha en la sección central de la viga asociada al momento máximo
$f_{Mplast}$	flecha en la sección central de la viga asociada al momento de plastificación
$f_{MQ}$	flecha en la sección central de la viga asociada al momento de carga
$f_{Mserv}$	flecha en la sección central de la viga asociada al momento de servicio
$h$	canto de la sección transversal de la viga
$J(t, t_0)$	Función de fluencia/ creep compliance function
$l$	Longitud de adherencia o de anclaje
$M-C$	Momento-curvatura
$M_{fis}$	Momento de fisuración
$M_{L350}$	Momento asociado a la flecha máxima admitida por el CTE

## NOTACIÓN

---

$M_{\text{máx}}$	Momento máximo
$M_{\text{plast}}$	Momento de plastificación
$M_Q$	Momento de carga
$M_{\text{serv}}$	Momento de servicio
pH	Índice pH. Potencial hidrógeno
$Q$	Carga aplicada
$Q - s$	Curvas carga – deslizamiento de los ensayos tipo pull-out
$R^2$	Coefficiente de variación de Pearson
$R_a$	Contenido de material bituminoso en el árido reciclado
$R_b$	Contenido de material cerámico en el árido reciclado
$R_c$	Contenido de hormigón o árido con hormigón en el árido reciclado
$R_g$	Contenido de cristal en el árido reciclado
$R_u$	Contenido de árido natural en el árido reciclado
$R_x$	Contenido de yeso en el árido reciclado
$s$	Deslizamiento de la barra en los ensayos tipo pull-out
$t - t_0$	Tiempo desde la aplicación de la carga
$u$	Perímetro de la sección
%HR	Humedad del ambiente
%RCA	Porcentaje de árido reciclado empleado
$\beta_E$	Relación entre módulos de deformación
$\varepsilon^0$	Deformación no mecánica del hormigón, independiente de la tensión
$\varepsilon_0$	Deformación elástica instantánea del hormigón en el instante de carga $t_0$
$\varepsilon_c$	Deformación del hormigón en el tiempo
$\varepsilon_{CO}$	Deformación pico del hormigón
$\varepsilon_{cr}$	Deformación de fluencia del hormigón
$\varepsilon_{cr,s}$	Fluencia unitaria
$\varepsilon_{crT}$	Fluencia total
$\varepsilon_{c\sigma}(t_0)$	Deformación mecánica del hormigón en el instante de carga $t_0$
$\varepsilon_{cu}$	Deformación última del hormigón
$\varepsilon_{dif}$	Deformación diferida del hormigón
$\varepsilon_{sh,t}$	Deformación de retracción del hormigón a $t$ días
$\varepsilon_{sh}$	Deformación de retracción del hormigón
$\varepsilon_{T^a}$	Deformación térmica del hormigón
$\varphi(t, t_0)$	Coefficiente de fluencia

---

$\varnothing$	Diámetro de la barra de acero en mm
$\rho$	Densidad del hormigón
$\rho_{end}$	Densidad del hormigón endurecido seco
$\rho_{sat}$	Densidad del hormigón endurecido saturado
$\rho_{ssd}$	Densidad del hormigón endurecido tras secado en estufa
$\sigma/f_c$	Nivel tensional aplicado
$\sigma-\epsilon$	Tensión-Deformación
$\sigma_c(t_0)$	Tensión en el hormigón en el instante de carga $t_0$
$\tau$	Tensión adherente
$\tau_{0.01}$	Tensión adherente asociada a un deslizamiento de 0.01 mm
$\tau_{0.1}$	Tensión adherente asociada a un deslizamiento de 0.1 mm
$\tau_1$	Tensión adherente asociada a un deslizamiento de 1 mm
$\tau_{máx}$	Tensión adherente máxima
$\tau_m$	Tensión adherente media
$\chi$	Coefficiente de envejecimiento
$\nu$	Módulo de deformación transversal



---

# I. INTRODUCCIÓN

---

## 1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha experimentado un incremento significativo en la generación de residuos que afecta a todos los sectores de las sociedades desarrolladas. El modelo productivo de desarrollo industrial que inspira las políticas económicas de la gran mayoría de países se basa en un aporte constante de recursos materiales provenientes del medio natural, que acabarán convirtiéndose en residuos una vez cumplida su vida útil. De esta forma se agrava el deterioro ambiental, ya que al agotamiento previsto de los recursos naturales se une la necesidad de destinar más y mayores espacios a vertedero, con las consecuencias sociales, ambientales y económicas que ello conlleva.

En respuesta a esta problemática surge el concepto de desarrollo sostenible, que pretende compatibilizar las necesidades sociales y económicas con el cuidado y protección del medio y los recursos naturales. La idea de establecer un modelo de crecimiento económico viable medioambientalmente aparece con la publicación del informe del Club de Roma en 1971, donde se plantea por primera vez la necesidad de modificar las directrices políticas y económicas de las sociedades desarrolladas o emergentes. Se establece que “el desarrollo debe satisfacer las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas”.

Desde ese lejano 1971, varios hitos internacionales han marcado los avances producidos y los retos pendientes: el informe Brundtland remitido a la ONU en 1987, la Cumbre de la Tierra en Río en 1992, la carta de Aalborg en 1996, el protocolo de Kyoto en 1997, la cumbre mundial de Johannesburgo en 2002 o la cumbre de la tierra Río+20 celebrada en Brasil en Junio de 2012. Amparadas por estas iniciativas institucionales surgen una serie de campañas de concienciación en diferentes sectores industriales, cuyo objetivo es implantar un modelo productivo compatible con el desarrollo económico.

En el sector de la construcción se produce también un continuo flujo de materiales que alimenta el ciclo productivo, necesariamente marcado por el fin de la vida útil de todas las construcciones. En ese momento éstas deben recibir nuevos aportes materiales para prolongar su etapa de servicio, o bien ser demolidas con la consiguiente generación de residuos de construcción y demolición. No se ha caracterizado el sector por su interés en la etapa de la desconstrucción, por lo que resulta difícil plantearse retos como la reducción o la reutilización de residuos de construcción y demolición si en la planificación del proyecto y la obra no se

introduce ese objetivo hasta sus últimas consecuencias. El profesor Antonio Aguado plasma esta idea en su conocido diagrama del Ciclo de la Construcción.

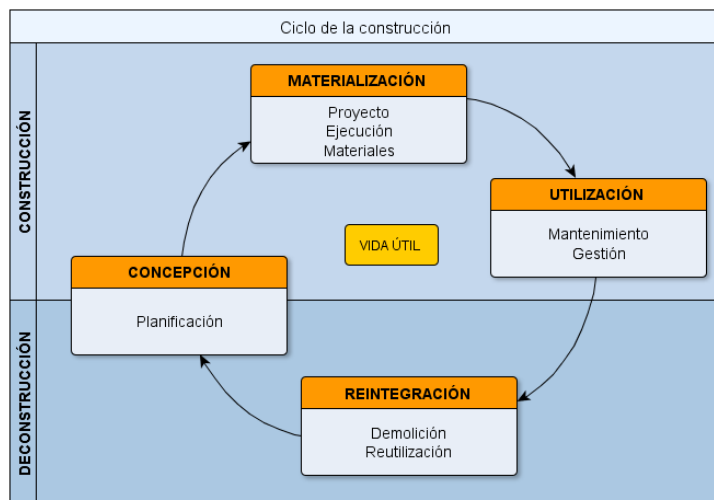


Figura I-1. Diagrama del Ciclo de la Construcción [AGUA03]

Siguiendo esta línea de reutilización y revalorización de residuos de construcción y demolición, se han desarrollado en los últimos años numerosos estudios e investigaciones en el ámbito del hormigón con árido grueso reciclado procedente de la demolición de estructuras de hormigón.

El Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición nace en el año 2001 y aborda el período 2001-2006 con más deseos que medios. En el marco del Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2007-2015, surge el II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (II PNRC). Paralelamente el CEDEX, unido a varios centros de investigación de toda España (entre ellos la Universidad de A Coruña), desarrolló en la última década el proyecto “Estudio experimental prenормativo sobre la utilización de RCDS en la aplicación de hormigón reciclado estructural (*RECNHOR*)” concedido por el Ministerio de Medioambiente. Tuvo continuidad inmediata con el proyecto CLEAM (Construcción Limpia, Eficaz y Amigable con el Medio Ambiente), con financiación del CDTI vinculada a los proyectos CENIT, que entre otras grandes líneas propias de la Construcción Sostenible incluía investigación específica sobre el empleo de áridos reciclados en hormigón estructural y no estructural. Por otro lado, alrededor del Gremio de Reciclaje y Derribos (GERD), se articuló el proyecto GEAR (Guía Española de Áridos Reciclados), concedido por el Ministerio de Medio Ambiente. Vinculando a decenas de empresas de reciclaje de RCDS y a varios centros de investigación, se elaboró una guía de áridos reciclados con distintos usos, entre los que se encuentra el del hormigón en masa, estructural o no estructural.

La mayor parte de los proyectos, especialmente REC�HOR, hicieron posible que apareciese en la instrucción española de hormigón estructural (EHE-08) un anejo de recomendaciones sobre hormigón reciclado, orientadas a introducir la sustitución de parte del árido grueso natural por reciclado, bien garantizado para sustituciones de hasta el 20%. Para porcentajes superiores, este anejo establece que el efecto sobre las distintas propiedades físicas, mecánicas o químicas puede variar, debiendo realizarse estudios específicos. Fomentar el empleo del árido reciclado, sin tradición en España pero muy común en otros países, y aportar argumentos sólidos para el desarrollo de futuras revisiones normativas exige, pues, realizar estudios más amplios que avalen el uso de los hormigones reciclados con mayores porcentajes de sustitución. Los datos más recientes apuntan a una tasa de reciclaje de los RCDs del 14% en el año 2011, lejos del 70% fijado por Europa como objetivo a alcanzar en el año 2020.



## 2 OBJETIVOS GENERALES

El objetivo básico de este trabajo es fomentar el empleo de los materiales obtenidos tras la desconstrucción de las estructuras de hormigón, una vez finalizada su vida útil, y contribuir a la difusión de la fabricación de hormigones con áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón estructural, proporcionando recomendaciones bien garantizadas para todo el rango de sustitución. Se trata, por tanto, de establecer los límites del empleo de árido grueso reciclado que deberán marcar los futuros desarrollos normativos en este campo.

El avance que se pretende alcanzar, que define el objetivo general de los trabajos, consiste en conocer el comportamiento instantáneo y diferido a flexión de los hormigones reciclados para todo el rango de sustitución (20, 50 y 100%) de la fracción gruesa del árido, comparándolo con el de los hormigones convencionales fabricados con áridos naturales.

Para ello es imprescindible, en primer lugar, realizar la caracterización de los hormigones reciclados, determinando sus propiedades en los estados fresco y endurecido. Deben conocerse la consistencia, la densidad, la absorción, las resistencias a compresión y a tracción, y el módulo de deformación, así como sus propiedades reológicas (retracción y fluencia). En hormigones convencionales es habitual estimar estas propiedades a través de expresiones normativas basadas en la resistencia a compresión determinada experimentalmente. Por ello se pretende evaluar la bondad de tales expresiones cuando se utilizan hormigones reciclados hasta el 100% de sustitución, adaptándolas mediante la incorporación de un factor de corrección, dependiente del porcentaje de árido reciclado empleado, que consiga una aproximación a la propiedad estimada equivalente en hormigones reciclados a la conseguida en hormigones convencionales.

Conocido el comportamiento del material sobre probeta, se aborda el análisis del comportamiento a flexión instantáneo y diferido sobre vigas. El estudio del comportamiento instantáneo se acomete sometiendo a vigas biapoyadas fabricadas con hormigón reciclado, con porcentajes hasta el 100% de sustitución, a un proceso de cargas incrementales hasta rotura. El estudio del comportamiento diferido se realiza aplicando a un conjunto de vigas, gemelas a las utilizadas en el análisis del comportamiento instantáneo, una carga sostenida de diseño durante 1000 días. En ambos casos el análisis incluye el estudio de solicitaciones, fisuración, deformaciones y flechas. El conocimiento adquirido, de nuevo, se aplica adaptando las expresiones normativas de cálculo del comportamiento estructural (rotura, fisuración, flechas...) a los hormigones reciclados, aceptando las expresiones existentes y proponiendo la incorporación de factores de corrección dependientes del porcentaje de árido reciclado empleado. Se pretende conseguir modelos predictivos generales que hagan equivalente, aplicados sobre hormigones convencionales y reciclados, la relación entre los parámetros experimentales y los calculados.

Por último, en esta misma línea, se desea identificar las posibles carencias en normativas y recomendaciones para el diseño de hormigones reciclados atendiendo a su comportamiento adherente, proponiendo factores de corrección dependientes del porcentaje de árido empleado que proporcionen iguales aproximaciones en las estimaciones con hormigón reciclado y con hormigón convencional. Se aborda este estudio realizando ensayos pull-out a diferentes edades.

## 3 RESUMEN

Esta tesis doctoral aborda el estudio de los hormigones reciclados con distintos porcentajes de sustitución de la fracción gruesa por árido reciclado (20%, 50% y 100%) para uso estructural. Para ello se fabrican dos series de hormigón, la primera con una relación agua/cemento ( $a/c$ )

igual a 0.50, que conferirá a los hormigones resistencias elevadas, y la segunda con  $a/c = 0.65$  con resistencias más moderadas. Se obtienen así seis tipos de hormigón reciclado denominados H50-20, H50-50, H50-100, H65-20, H65-50 y H65-100, que se compararán a los fabricados con hormigón convencional, H50-0 y H65-0.

Se lleva a cabo, en primer lugar, un análisis bibliográfico que permite recopilar la información disponible acerca de los estudios e investigaciones realizados en los últimos años sobre hormigones estructurales reciclados. Las distintas fuentes y referencias consultadas se resumen en el *Capítulo II*, junto a los objetivos específicos derivados de este análisis.

En el *Capítulo III* de este documento se detalla el programa experimental en el que, inicialmente, se describen los materiales utilizados, las dosificaciones propuestas y el proceso de amasado empleado en la fabricación de los hormigones. A continuación, se detallan los ensayos de caracterización del hormigón (consistencia, densidad, absorción, resistencias a compresión y tracción, módulo de deformación longitudinal y transversal, diagrama tensión – deformación, retracción y fluencia) y los ensayos estructurales realizados en cada una de las dos fases en las que se divide el programa experimental. En la primera de ellas, denominada Fase Vigas, se realizó el análisis estructural a flexión, y en la segunda, designada Fase Adherencia, se llevaron a cabo ensayos de adherencia por arrancamiento, de tipo pull-out, sobre probeta cúbica. En la Fase Vigas se determinó la respuesta estructural a flexión de los hormigones reciclados bajo cargas incrementales (Fase Vigas I) y bajo carga sostenida (Fase Vigas II).

Los resultados y análisis de la caracterización del hormigón se describen en el *Capítulo IV*. Durante la Fase Adherencia se realizaron ensayos, únicamente, de medida de la consistencia y de la resistencia a compresión a diferentes edades (7, 28, 90 y 365 días), necesarios para el estudio del comportamiento adherente. Durante la Fase Vigas la caracterización de los hormigones comprendió el análisis de la mayoría de sus propiedades en estado fresco y endurecido. En primer lugar se determinaron la consistencia y densidad del hormigón en estado fresco, y posteriormente se realizó la caracterización en estado endurecido: densidad, absorción, resistencias mecánicas (compresión y tracción), módulo de deformación, diagrama tensión - deformación, retracción y fluencia.

En el *Capítulo V* se realiza el estudio del comportamiento a flexión bajo cargas incrementales hasta rotura sobre las cuatro vigas de cada serie, H50 y H65 (Fase Vigas I), a 28 días. Se realiza un análisis seccional que pretende determinar la evolución de deformaciones hasta rotura y conocer la curvatura desarrollada por cada uno de los hormigones de estudio. A continuación se determinan los momentos flectores de fisuración, servicio, plastificación y máximo en la sección central. Por último, se estudian la fisuración y la deformabilidad, la primera mediante el registro de su evolución en mapas de fisuras y la segunda identificando las flechas correspondientes a los momentos de fisuración ( $f_{Mfis}$ ) y de plastificación ( $f_{Mplast}$ ), y a los momentos máximo ( $f_{Mmáx}$ ) y de servicio ( $f_{Mserv}$ ).

La respuesta estructural a flexión de los hormigones reciclados bajo carga sostenida se analizó en el *Capítulo VI* mediante el ensayo de vigas idénticas a las empleadas para el estudio de comportamiento bajo cargas incrementales. El ensayo se inició a 42 días ( $t_0$ ) con la aplicación de la carga sostenida de diseño mediante un sistema elemental de palanca, y se prolongó durante 1000 días. El análisis incluye el estudio de deformaciones y flechas diferidas.

Por último, en el *Capítulo VII* se analizaron los resultados obtenidos en la Fase Adherencia. Sobre todos los tipos de hormigón diseñados se realizaron ensayos de arrancamiento tipo pull-out que permitieron el estudio del comportamiento adherente. El análisis incluyó el estudio de los modos de fallo, de la forma de la curva tensión de adherencia – deslizamiento, y, por último de las tensiones de adherencia máximas y medias de todos los hormigones.

En todos los casos, los resultados obtenidos se han utilizado para evaluar la bondad de las expresiones normativas en la predicción de las propiedades de los hormigones reciclados (básicas y estructurales) y, tomando estas expresiones como base, se ha propuesto la incorporación de factores de corrección dependientes del porcentaje de árido reciclado empleado, que consiguen una aproximación a la propiedad estimada equivalente en hormigones reciclados y en hormigones convencionales.

Los *Capítulos VIII y IX* recogen las conclusiones derivadas del estudio desarrollado y las referencias bibliográficas empleadas.



---

# II. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

---

## 1 INTRODUCCIÓN

Una de las principales aportaciones que el sector de la construcción puede hacer a la conservación del Medio Ambiente y al desarrollo sostenible es la reutilización de los residuos que genera su propia actividad. Esta revalorización trata de introducir en los procesos productivos materiales que tenían como destino final el vertedero, es decir, aumentar el ciclo de vida de estos materiales, lo que supondrá tanto un ahorro de depósitos en vertedero como un ahorro en la extracción de recursos naturales

EL Código Modelo 2010 [MC-10] fomenta el uso de los “Green concretes”, cuya fabricación pasa por sustituir parte del cemento necesario por otro ligante o por emplear árido reciclado en lugar de natural. Además, contempla la posibilidad de excluir de la fabricación de los hormigones aquellas sustancias que dañen el medio ambiente, como adiciones o aditivos altamente contaminantes. No existe actualmente información disponible sobre la constitución y durabilidad de los “Green concretes”, por lo que un experto debe encargarse de garantizar el comportamiento estructural de los mismos de acuerdo a la composición que tengan en cada caso.

Siguiendo esta línea de reutilización y revalorización de residuos de construcción y demolición, se han desarrollado en los últimos años numerosos estudios e investigaciones sobre el hormigón fabricado con árido grueso reciclado procedente de demolición de hormigón. Estos hormigones emplean residuos de construcción y demolición (RCDs) que proceden en su mayor parte de derribos de edificios o de pequeñas obras de reformas en viviendas o urbanizaciones.

## 2 ARIDOS PARA HORMIGONES RECICLADOS

La incorrecta gestión de los residuos de construcción y demolición ha provocado un fuerte deterioro ambiental y paisajístico, ya que el depósito en terrenos no acondicionados trae como consecuencia la contaminación del suelo o incluso de las aguas subterráneas, debido a que algunos pueden contener residuos peligrosos, como amianto, fibras minerales, disolventes, pinturas, resinas, CFCs de conductos de refrigeración, PCBs de transformadores, compuestos halogenados para protección del fuego, luminarias de mercurio, etc. Este deterioro del medio ambiente también se debe al impacto que genera la extracción y consumo excesivo de los recursos naturales para la elaboración de

materiales, desaprovechando una cantidad importante de residuos susceptibles de ser recuperados o reciclados (la *Figura II-1* muestra el aspecto habitual de un contenedor de residuos de construcción y demolición).



Figura II-1. Contenedor de residuos de construcción

Todo ello ha provocado que las distintas Administraciones Públicas comiencen a regular la gestión de este tipo de residuos, avanzando en la misma línea que hace algunos años cuando se realizó una labor de concienciación ciudadana sobre la importancia de separar y reciclar vidrios, plásticos o papel, presentes en el residuo sólido urbano característico. De esta forma, se introduce la idea de considerar potencialmente que cualquiera de los residuos de construcción y demolición es un nuevo material secundario que puede ser aprovechado una vez ha finalizado la vida útil de la estructura de la que formaba parte (*Figura II-2*).



Figura II-2. Gestión de residuos

Así, en las últimas décadas se han desarrollado diferentes estudios e investigaciones, tanto nacionales como internacionales, para tratar de definir pautas y recomendaciones que permitan el reciclaje de dichos residuos como árido para fabricar nuevos hormigones.

### 2.1 Definición Árido reciclado

Se entiende por árido reciclado aquel que resulta del procesamiento de materiales inorgánicos utilizados previamente en la construcción. En función de su composición, puede clasificarse en alguno de los siguientes tipos:

- Árido reciclado de hormigón: procede de aquellos residuos de hormigón de cemento con clinker Portland y áridos naturales, machacados, cribados y procesados en plantas de reciclado. El material obtenido de esta forma no puede considerarse uniforme al contener diferentes proporciones de árido, mortero y de otros subcomponentes cuyo contenido debe limitarse.
- Árido reciclado cerámico: obtenido por procesamiento de material predominantemente cerámico. El 85% de este árido debe tener una densidad seca superior a 1600 kg/m<sup>3</sup> para evitar materiales excesivamente porosos y ligeros.
- Árido reciclado mixto: deberá contener un porcentaje mayor del 50% de hormigón con una densidad seca superior a 2100 kg/m<sup>3</sup> y no más del 50% de materiales pétreos reciclados de distinta naturaleza que el hormigón, incluyendo los cerámicos con una densidad seca mayor de 1600 kg/m<sup>3</sup>.

Los primeros estudios sobre el comportamiento de los hormigones reciclados estructurales se realizaron a lo largo de la segunda mitad del siglo XX. En 1987 Nixon [NIXO87] concluye, tras analizar resultados sobre propiedades básicas de los áridos reciclados, que aquellos que proceden de la demolición de hormigón (básicamente obtenidos de probetas o testigos ensayados en los laboratorios) presentan un buen comportamiento como áridos para hormigones.

Actualmente, el árido reciclado procede de procesos de construcción, demolición o deconstrucción de estructuras existentes, lo que permite investigar con material real. Es bien conocido que, entre otros factores, el origen de los áridos induce distintas características, fundamentalmente vinculadas al envejecimiento y grado de hidratación del mortero adherido, el cual siempre está presente en mayor o menor medida, en el árido reciclado procedente del hormigón.

## 2.2 Propiedades de los áridos reciclados

Se presentan a continuación las primeras líneas de investigación en torno a los hormigones reciclados fabricados con áridos procedentes de hormigón, considerados de mejor calidad y más aptos para su empleo que aquellos con elevados porcentajes de cerámicos, asfalto, yesos, plásticos o vidrio, cuya composición podría alterar el nuevo hormigón a fabricar.

De los estudios realizados durante los años 70 y 80 se extraen importantes conclusiones sobre las características y condiciones de los áridos de hormigón para que su empleo en hormigones sea posible.

Principal seña de identidad de sus propiedades mecánicas, los áridos reciclados presentan una elevada absorción de agua en comparación con los áridos naturales. Hansen y Narud [HANS83] obtienen valores de absorción entre el 8.7% y el 3.7% para las fracciones de áridos reciclados de 4-8 mm y 16-32 mm, respectivamente. Estos valores contrastan enormemente con la absorción de los áridos naturales, del 3.7 al 0.8% para las mismas fracciones granulométricas. Hasaba et al. [HASA81] fija una absorción del 7% para la fracción 25-2mm, con independencia del tipo de mortero viejo adherido, valor muy superior al de los áridos convencionales.

En cuanto a la fracción fina (por debajo de 5 mm) estos autores [HANS83; HASA81] identifican una absorción del 11%, relativamente superior a la obtenida para la fracción gruesa. Otras investigaciones realizadas en esas décadas [BSCJ77; RAVI85; KARA86] corroboran que los rangos de absorción se ajustan a los intervalos [3.6 - 8%] y [8.3 - 12.1%] para las fracciones gruesa y fina respectivamente.

La mayoría de los autores coinciden en señalar que el incremento de absorción de agua es consecuencia directa del mortero viejo adherido en los áridos originales [SANC09; GONZ11], responsable además del ligero descenso en las densidades de los áridos de hormigón respecto a los naturales. Kreijger [KREI83] establece una relación parabólica entre la absorción de agua y la densidad.

La norma japonesa [BSCJ77], propuesta para el empleo del árido reciclado en hormigones, limita la absorción al 7% para la fracción gruesa y al 13% para la fina.

Como resultado de estos primeros estudios, se establece la necesidad de determinar en laboratorio la absorción y la proporción de finos de los áridos reciclados. De este modo es posible diseñar adecuadamente la dosificación de los hormigones reciclados, teniendo en cuenta las posibles variaciones debidas al incremento de la absorción que presenten los áridos con mortero adherido. El amasado se ve también influido por la absorción que los áridos reciclados experimentan al contactar con el agua en la amasadora, situación cuyo gobierno sugiere la saturación o pre-saturación de los áridos antes de su incorporación a la amasadora para el mezclado, manteniendo de esta forma una calidad uniforme en la producción de hormigón. Estos métodos fueron estudiados por Goeb [GOEB85], dejando abiertos numerosos interrogantes que serían abordados por estudios posteriores.

### 3 FABRICACIÓN DE LOS HORMIGONES RECICLADOS

Como ya se ha indicado, diferentes estudios han constatado que la presencia de mortero adherido en la superficie de los áridos reciclados supone un notable incremento de la absorción de agua [HANS83; NIXO87; GONZ08], y por tanto un riesgo de reducción en la cantidad de agua disponible para combinarse con el cemento en la amasadora si los áridos reciclados se introdujeran sin ninguna medida adicional. Durante los años 90 y principios del siglo XXI se desarrollan procedimientos y métodos que mitigan las variaciones de trabajabilidad y uniformidad de los hormigones reciclados, a fin de hacer viable su fabricación y conseguir algún día su implantación en el mercado. Entre los métodos planteados cobran especial fuerza los basados en la pre-saturación del árido, en la incorporación del agua a la amasadora y la aspersión.

La pre-saturación del árido consiste en saturar los áridos en agua mediante inmersión durante el tiempo suficiente para que el árido alcance un 70-80% de su capacidad de absorción. Algunos autores [RÜLH92; GONZ02; SANC05; PARR03] proponen un tiempo aproximado de inmersión de 10 minutos para que el árido alcance el nivel de saturación indicado. Este método presenta como inconveniente la incertidumbre de la cantidad real de agua que se está aportando al hormigón. No resulta sencillo conocer con exactitud si el árido está o no saturado, o si parte del agua de saturación se combinará o no con el cemento variando la relación a/c y, por tanto, la resistencia del hormigón. La Figura II-3 y la Figura II-4 proponen diferentes curvas experimentales que relacionan las absorciones a 10 minutos y a 24 horas.

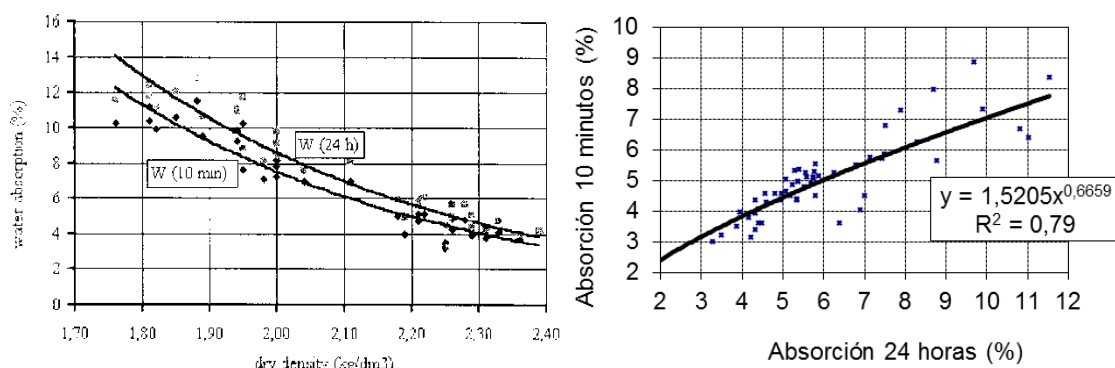


Figura II-3. Rülh, 1997 [RÜLH92] Figura II-4. Sánchez de Juan, 2004 [SANC05]

Ravindrarah [RAVI87] propone el método de amasado en seco, mediante el que se realiza la mezcla de los áridos sin saturar y posteriormente se incorpora a la amasadora el agua necesaria



para compensar su absorción. La desventaja de este procedimiento estriba en la pérdida de fluidez durante los primeros diez minutos, especialmente para altos porcentajes de sustitución.

Por último, Etxeberria [ETXE04] propone la aspersión de los áridos previa a la fabricación del hormigón, a fin de minimizar la posible absorción de agua libre por parte de los áridos reciclados en la amasadora. Este procedimiento resulta especialmente adecuado para procesos de producción de hormigón a gran escala.

Cabe destacar que el hecho de emplear un proceso de amasado u otro influirá enormemente en la trabajabilidad de los hormigones fabricados y, por tanto, en su relación agua/cemento efectiva. Numerosos autores [CORI10; DAPE11; LOPE09; RAHA08; GONZ11] proponen ajustar la cantidad del aditivo superplastificante a las necesidades de los diferentes hormigones, con el fin de minimizar el impacto del proceso de amasado y obtener valores de consistencia similares entre convencionales y reciclados con diferentes porcentajes de sustitución de árido.

## 4 PROPIEDADES DE LOS HORMIGONES RECICLADOS

Paralelamente a los estudios sobre las propiedades de los áridos reciclados se desarrollaron numerosas investigaciones sobre el comportamiento del hormigón reciclado. Las primeras trataron de definir las propiedades básicas de estos hormigones, con el objetivo de determinar su comportamiento en estado fresco y endurecido, las variaciones que se producen en sus propiedades físicas, mecánicas y reológicas para diferentes porcentajes de sustitución, y los diferentes procesos de amasado propuestos para mitigar los efectos de la elevada absorción de los áridos.

Estudios posteriores centraron sus esfuerzos en definir el comportamiento estructural de los hormigones reciclados, esencialmente a cortante y flexión; y más recientemente la adherencia entre dichos hormigones y las armaduras pasivas.

### 4.1 Propiedades físicas

En numerosos trabajos se ha constatado una reducción en la densidad de los hormigones reciclados, tanto en estado fresco como endurecido, a medida que aumenta el porcentaje de sustitución del árido natural por reciclado [MAS12; BRIT10; DOMI10; ETXE07; KATZ03]. Esta caída se debe principalmente a la menor densidad de los áridos reciclados, causada por la presencia de mortero adherido y la menor porosidad intrínseca de los mismos [BRIT10; MAS12]. Diferentes autores han realizado análisis comparativos que permiten relacionar de forma lineal la densidad de los áridos empleados y la de los hormigones obtenidos a partir de ellos (Figura II-5).

Por otra parte, la absorción experimenta la tendencia opuesta, aumentando su valor al crecer el contenido de árido reciclado en el hormigón [KWAN12; BRIT10]. Esta relación se debe principalmente a la absorción de los áridos reciclados con mortero adherido, mayor que la de los convencionales, por lo que es predecible que aquellos hormigones cuyos componentes presentan una mayor absorción tendrán también mayores coeficientes de absorción.

En resumen, pues, una mayor proporción de árido reciclado en los hormigones supone una menor densidad del hormigón y mayores coeficientes de absorción (Figura II-6).

Tanto la absorción como la densidad de los hormigones reciclados presentan una considerable repercusión en las propiedades mecánicas y el comportamiento estructural de los mismos. Numerosos autores han analizado tal repercusión principalmente sobre la resistencia a compresión y el módulo de deformación (Figura II-7).

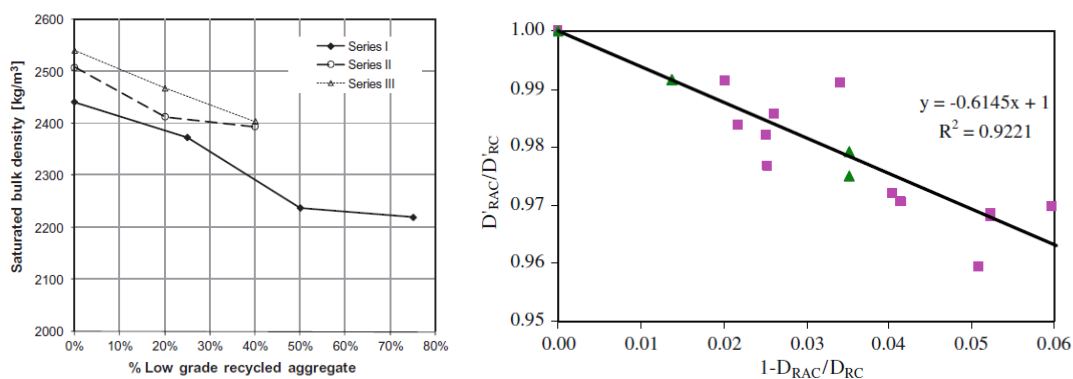


Figura II-5. Relación entre la densidad de los áridos y la densidad del hormigón [BRIT10; MAS12]

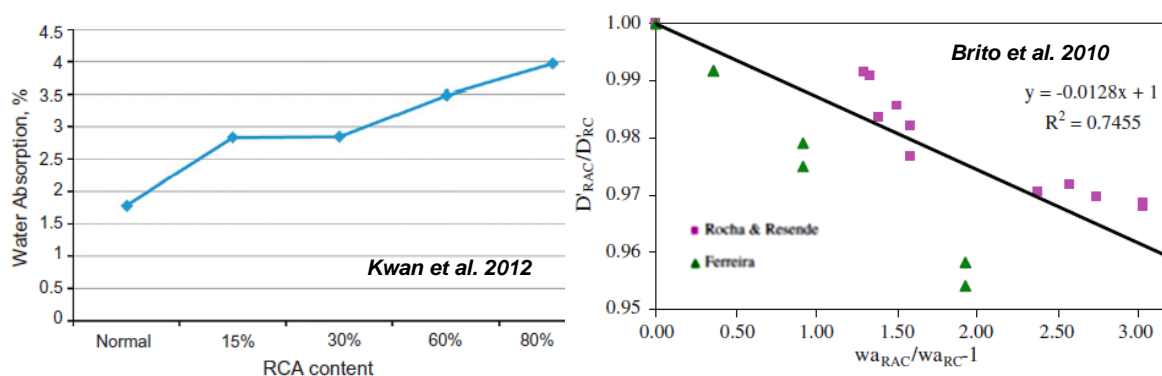


Figura II-6. Relación entre la absorción del hormigón reciclado y el contenido y la densidad del árido reciclado [BRIT10; KWAN12]

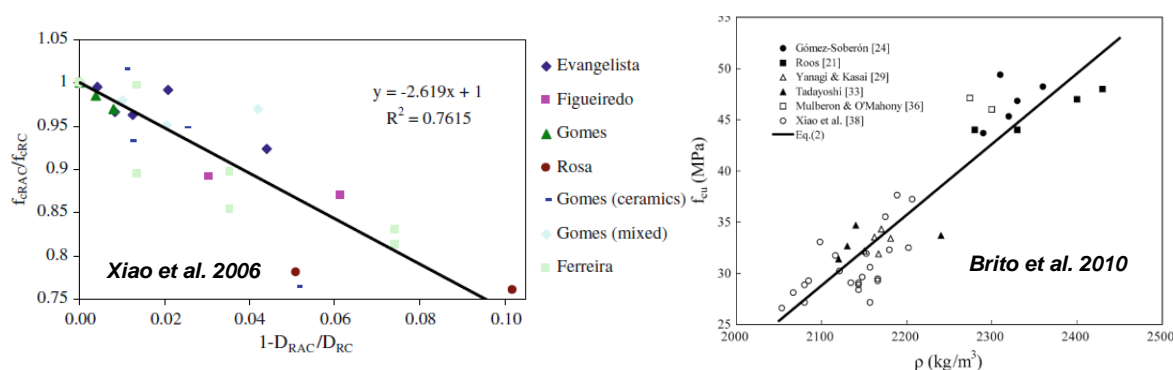


Figura II-7. Relación entre la densidad del hormigón y la resistencia a compresión [XIAO05; BRIT10]

## 4.2 Resistencia a compresión

Las propiedades mecánicas de los hormigones reciclados, y en concreto la resistencia a compresión, varían a medida que se incrementa la tasa de sustitución del árido natural por reciclado.

En 1978, la sociedad japonesa de empresarios de la construcción establece reducciones de la resistencia a compresión de los hormigones reciclados entre el 14 y el 32%. Diferentes autores avalan posteriormente este rango, amplio al depender de las propiedades de los áridos empleados, del proceso de amasado utilizado y de la propia resistencia del hormigón de origen. Se constatan así reducciones de la resistencia a compresión, en los hormigones fabricados íntegramente con

árido reciclado (Figura II-8), del 10% [WESC82; BUCK77; MALH78; SCHU86; FRON77; LIU05], del 20% [NIXO87; WANG07], 23-25% [RAVI85; LIJ04; POON07] y de hasta el 35% [KWAN12].

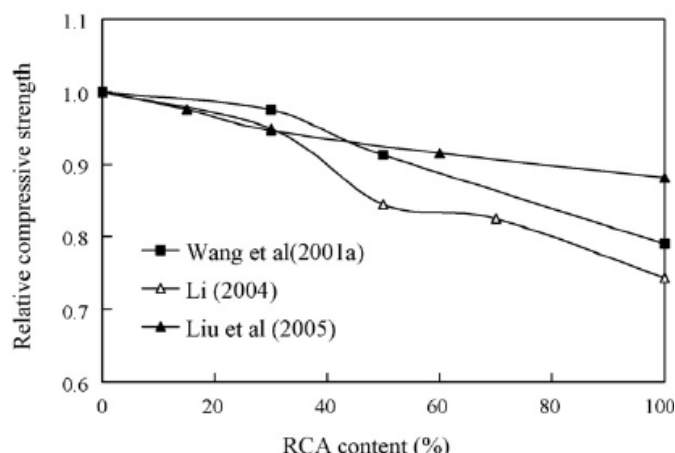


Figura II-8. Resistencia a compresión de hormigones reciclados [LIX08]

Investigaciones realizadas en España también abordan la pérdida de resistencia. Para rangos de sustitución del 20 al 100% del árido se obtienen reducciones del 7 al 13% [SANC05] y del 3.5% [ETXE07]. Si se sustituye exactamente el 50% del árido grueso natural por reciclado se miden pérdidas variables, desde el 1% [GONZ02] hasta el 12% [PARR03].

Además de la tasa de sustitución del árido reciclado presente en el hormigón, la reducción de la resistencia depende también de numerosos condicionantes que influyen de manera directa en los hormigones. Uno de los factores a tener en cuenta es la calidad o composición de los áridos reciclados, tal como constata Mas et al. [MAS12] en su estudio de hormigones fabricados con diferentes tipos de árido reciclado de baja calidad. Achaca a este parámetro caídas de la resistencia de entre el 13 y el 40%.

La calidad de los áridos reciclados empleados en la fabricación de hormigones se mide, entre otros parámetros, por la absorción de aquellos. En esta línea, Kou et al. [KOU12] estableció comparaciones entre las resistencias a compresión obtenidas para varios hormigones reciclados fabricados con la misma relación a/c y tres tipos de árido diferentes definidos por sus coeficientes de absorción. Los resultados obtenidos mostraron que las caídas de la resistencia en los hormigones reciclados eran mayores cuanto mayor era el coeficiente de absorción de los áridos empleados. En los hormigones fabricados íntegramente con reciclado las reducciones fueron del 36, 26 y 12% para absorciones del 6, 5 y 4%, respectivamente.

La mayor parte de los autores coinciden en señalar que las propiedades de los áridos empleados son los principales condicionantes de la mayor o menor resistencia a compresión de los hormigones. Entre dichas propiedades destaca principalmente la cantidad de mortero adherido al árido, que repercute de forma directa en la menor densidad y mayor absorción de los mismos. Se concluye, por tanto, que las propiedades de los hormigones reciclados están directamente relacionadas con la densidad, absorción y cantidad de mortero adherido de los áridos, a su vez dependientes entre sí (Figura II-9).

Por otra parte, la relación agua/cemento empleada en la fabricación de los hormigones o la resistencia a compresión del hormigón que da origen a los áridos son también factores a considerar en el análisis de las resistencias. El primero de ellos (a/c) representa un condicionante fundamental en las resistencias mecánicas de cualquier tipo de hormigón, reciclado o no, dado que una baja relación a/c genera, habitualmente, un hormigón con mayores resistencias mecánicas. A fin de determinar si dicho parámetro supone también un factor determinante en el comportamiento de los hormigones reciclados, se han desarrollado estudios con diferentes relaciones a/c, cuyos resultados

no apuntan a una tendencia común. Por un lado, Corinaldesi [COR10a] obtiene variaciones de la resistencia a compresión de entre el 18 y el 23% para hormigones con una tasa de sustitución de árido natural por reciclado del 30%, con independencia de la relación a/c. Sin embargo, otros autores [RAHA08; KATZ03] constatan caídas de la resistencia a compresión ligeramente superiores en aquellos hormigones con menor ratio a/c, de mayor resistencia por tanto.

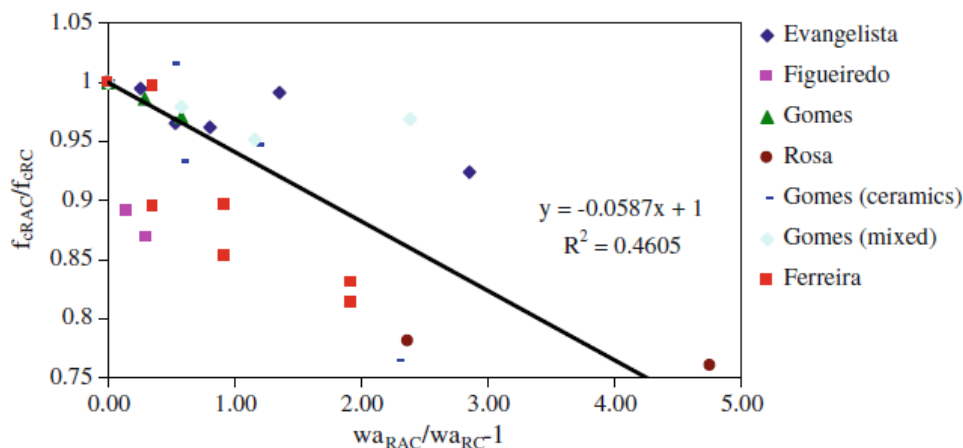


Figura II-9. Relación entre la absorción del árido y la resistencia a compresión del hormigón [BRIT10]

Una vez determinada la resistencia a compresión de los hormigones reciclados con diferentes tasas de sustitución, resulta imprescindible definir su evolución en el tiempo. Con este fin se han desarrollado diferentes estudios [KWAN12; KOU12; GONZ08; POON07; ETXE07; EVAN07] en los que se analiza la resistencia a compresión de los hormigones reciclados a diferentes edades, teniendo en cuenta los factores analizados previamente (Figura II-10).

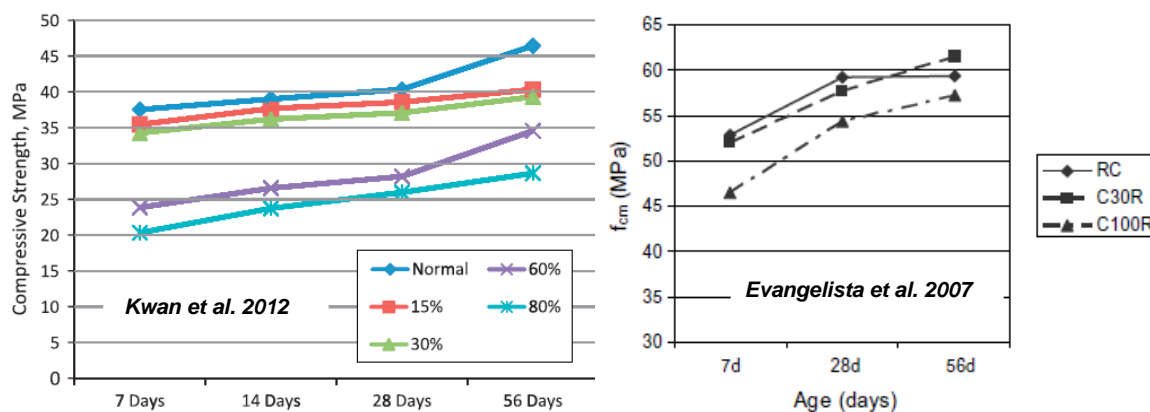


Figura II-10. Evolución de la resistencia a compresión de los hormigones reciclados [KWAN12; EVAN07]

Recientemente Kwan et al. [KWAN12] ha publicado que los hormigones reciclados experimentan una evolución gradual de sus resistencias a compresión entre los 7 y los 56 días, mientras que en los de control (sin árido reciclado) se observaba un acentuado incremento a partir de los 28 días. Sin embargo, otros autores [POON07; EVAN07] observan que las resistencias de los hormigones fabricados con porcentajes de árido reciclado superiores al 30% siguen creciendo hasta los 56-90 días con mayor intensidad que las del hormigón de control, mientras que los hormigones en los que no se supera el 20% de sustitución aproximan su evolución resistente a la de los de control, con poco crecimiento a partir de los 28 días. Contrariamente, Kou et al. [KOU12] indican una evolución similar de las resistencias en los hormigones reciclados y los de control. Se constatan, por tanto, diferencias notables en los resultados extraídos de la bibliografía existente.

La caída de resistencias a compresión en los hormigones reciclados, respecto a la obtenida para el convencional, es mayor a edades tempranas (1-14 días) que a partir de los 28 días. En términos cuantitativos las reducciones son del 39-44% [KWAN12], del 27-40% [KOU12] o del 23-29% [POON07] a edades tempranas, y del 35-37% a 56 días [KWAN12] o del 5-30% a 90 días [KOU12; POON07], dependiendo de distintos factores como la calidad del árido empleado, la resistencia del hormigón de origen o la relación a/c empleada.

### 4.3 Resistencia a tracción

La resistencia a tracción presenta mayor dispersión que la de compresión, por lo que no existen conclusiones unánimes acerca de su variación respecto a la del hormigón de control. A pesar de ello, es una de las propiedades que parece estar menos afectada por el empleo de árido reciclado grueso, tal como constata Hendriks [HEND98], quien obtiene caídas de resistencia del 10% respecto a la del hormigón de control, y del 20% si se sustituye también la fracción fina por árido reciclado.

Butler [BUTL12] también constata una considerable dispersión en los resultados experimentales de la resistencia a tracción obtenidos con los hormigones reciclados, cuyos valores oscilan entre 0.78 y 1.08 veces la resistencia del convencional.

Para sustituciones del 100% de la fracción gruesa las pérdidas de resistencia a tracción oscilan entre el 6 y el 20%, mientras que para sustituciones inferiores al 50% las diferencias son inapreciables. Ravindrarajah [RAVI85; RAVI87] observa reducciones del 2 al 13%, según la calidad del hormigón estudiado, mientras que otros autores constatan descensos en la resistencia del 10 al 20% [YAMA88; ZEGA06] o del 6% [KATZ00].

Algunos estudios [GONZ05; ETXE07] muestran caídas despreciables de la resistencia a tracción para el 100% de sustitución; en contraposición a aquellos [HANS83; DINI98] que observan reducciones del 30% en los hormigones reciclados respecto a los convencionales.

En general, sin embargo, puede afirmarse que la resistencia a tracción tiende a disminuir su valor a medida que aumenta el contenido de árido reciclado en el hormigón [LIU05; XIAO05], influyendo también, por supuesto, la calidad del árido con que se fabrica [MAS12]. En la *Figura II-11* se muestran diversos resultados experimentales sobre esta cuestión.

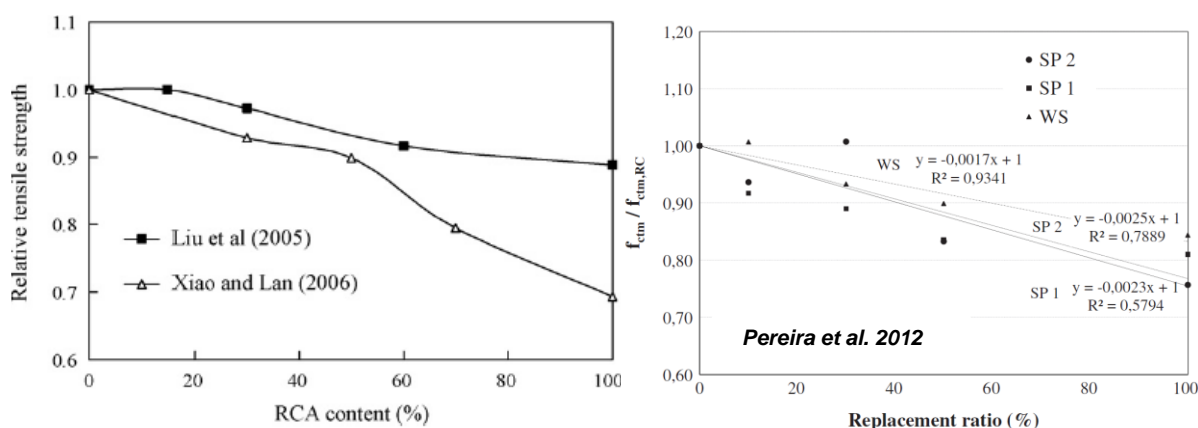


Figura II-11. Resistencia a tracción en hormigones reciclados [LIX08; PERE12]

González et al. [GONZ08] realiza un estudio a tres edades diferentes sobre hormigones fabricados con el 50% de árido reciclado. Respecto a los hormigones de control constata incrementos de la resistencia a tracción del 1.5% a 7 y 115 días y caídas del 4.77% a 28 días. Esta tendencia varía con la incorporación de humo de sílice, cuyo efecto provoca un ligero incremento de las resistencias a todas las edades.

Etxeberria et al. [ETXE07] estudia las propiedades de los hormigones fabricados con 3 porcentajes de sustitución (25, 50 y 100%) fijando como edades de ensayo 28 días y 6 meses. En este caso, los hormigones reciclados con elevadas tasas de sustitución (50-100%) muestran incrementos de la resistencia a tracción del 9-18% entre ambas edades. La sustitución del 25% conduce a incrementos del 28%, similar a los convencionales cuyo aumento se cuantifica en un 29%.

Algunos autores han propuesto fórmulas empíricas que permiten predecir la resistencia a tracción de un hormigón reciclado a partir de su resistencia a compresión y teniendo en cuenta, además, el porcentaje de sustitución del mismo. Algunas de estas propuestas se reflejan en la *Tabla II-1* [XIAO05; LI08].

Autor y año	Fórmula
Xiao et al (2005)	$f_{ct} = 0.24 f_{cu}^{0.64}$
Li (2008)	$f_{ct} = (0.24 - 0.06r) f_{cu}^{2/3}$

Tabla II-1. Expresiones empíricas para la predicción de la resistencia a tracción en hormigones reciclados

Los escasos estudios realizados en esta línea y la elevada dispersión en los resultados existentes hacen que actualmente no exista un acuerdo unánime sobre qué expresión debería utilizarse para los hormigones reciclados.

#### 4.4 Módulo de deformación

El módulo de deformación disminuye a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución de la fracción gruesa del árido natural por reciclado, tal como concluyen diferentes autores [GONZ08; ETXE07; ZEGA06; SANC05]. La pérdida porcentual que se observa en dichos hormigones, comparada con el módulo medido en los convencionales, varía considerablemente según diferentes factores. Mientras algunos estudios (*Figura II-12*) muestran caídas del 15% en los hormigones fabricados íntegramente con árido grueso reciclado [DOMI10; ETXE07] o al 50% de sustitución [GONZ08], otros alcanzan reducciones del 39% para tasas de sustitución del 100% [ZEGA06].

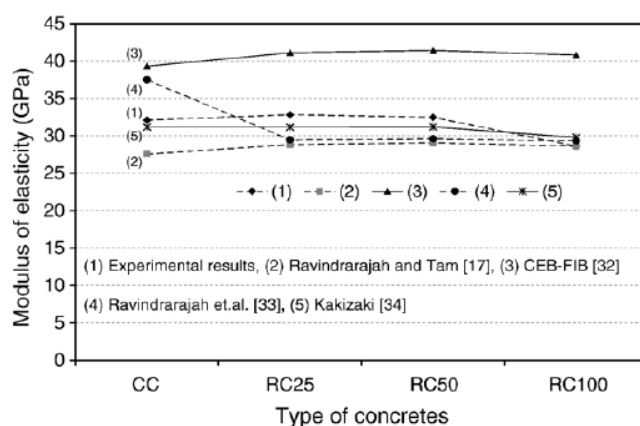


Figura II-12. Valores del módulo de elasticidad para diferentes cantidades de árido reciclado [ETXE07]

Como ocurría con las resistencias mecánicas, el módulo de deformación en el hormigón reciclado está fuertemente influenciado por la densidad y absorción del mismo [BRIT10]. Se reduce  $E_c$  en aquellos hormigones con densidades inferiores y absorciones elevadas, lo que se asocia en un mayor contenido de árido reciclado según observó Brito et al. [BRIT10] en sus estudios (*Figura II-13*).

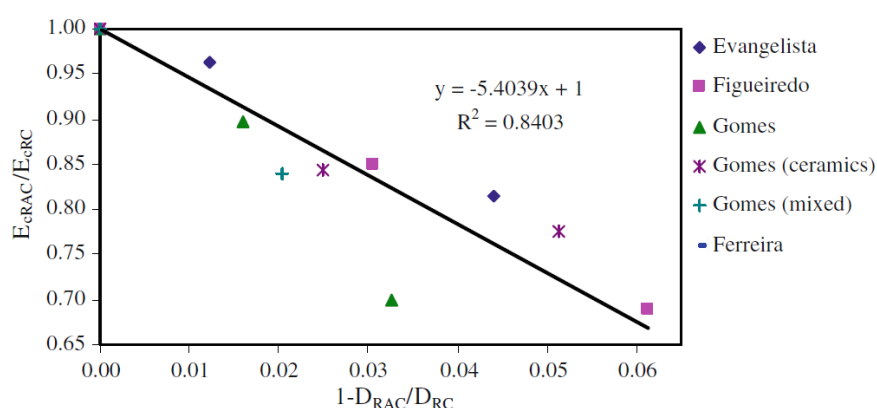


Figura II-13. Relación de la densidad del hormigón con el módulo de deformación [BRIT10]

Numerosos autores [RAVI85; DILL98; DHIR99; MELL99; CORI10; GONZ11] han propuesto diferentes fórmulas para estimar el valor del módulo de deformación de los hormigones reciclados a partir de la resistencia a compresión sobre probeta cúbica. Una de las principales incógnitas en el planteamiento del cálculo del módulo elástico radica en las variables que conviene adoptar. Debe aclararse si el menor módulo queda suficientemente representado por la menor resistencia a compresión de los hormigones reciclados, o bien debe añadirse algún parámetro adicional por la simple presencia del árido reciclado. Algunos investigadores [KAZI88; ZILCO1] consideran, en este sentido, el valor de la densidad del hormigón para estimar  $E_c$  con mayor exactitud.

Dependiendo de los factores y condiciones de ensayo las expresiones propuestas muestran un ajuste adecuado en algunos casos y dispersiones considerables en otros, por lo que no existe tampoco en este caso una expresión unificada que permita predecir el valor del módulo en los hormigones reciclados de forma generalizada e independiente de las particularidades de cada campaña experimental. La *Tabla II-2* presenta varias propuestas para estimar  $E_c$ .

Expresión	
<b>González-Fonteboa et al.</b>	$E_c = 22000 \left( \frac{f_c}{10} \right)^{0.3} (1 - 0.0020 \times \% RCA)$
<b>Corinaldesi</b>	$E_c = 18800 \sqrt[3]{\frac{0.83 f_{cu}}{10}}$
<b>Ravindrarajah and Tam</b>	$E_c = 7770 f_{cu}^{0.33}$
<b>Kazikaki et al.</b>	$E_c = 190000 \left( \frac{\rho}{2300} \right)^{1.5} \sqrt{\frac{f_{cu}}{2000}}$
<b>Dillmann</b>	$E_c = 634.43 f_{cu} + 3057.6$
<b>Dhir et al.</b>	$E_c = 370 f_{cu} + 13100$
<b>Mellmann</b>	$E_c = 378 f_{cu} + 8242$
<b>Zilch and Roos</b>	$E_c = 9100 (f_{cu} + 8)^{1/3} \left( \frac{\rho}{2400} \right)^2$

Tabla II-2. Predicción del módulo de elasticidad en hormigones reciclados



## 4.5 Diagrama tensión – deformación

El diagrama tensión-deformación de un hormigón define su deformación a distintos niveles de carga, proporcionando valores fundamentales, como son la deformación de pico y última, para el diseño estructural de los hormigones.

Los primeros estudios realizados sobre el diagrama tenso-deformacional de los hormigones reciclados [HANS92; ACHE06] apuntaban a un comportamiento similar al de los convencionales, considerando que las expresiones de cálculo propuestas por diferentes códigos y normativas para el diseño en estado límite último (E.L.U.) eran adecuadas también para los hormigones reciclados.

Distintos autores [RUHL92; RAHA08] señalan ligeras diferencias entre las curvas tensión-deformación de los hormigones reciclados y las de los convencionales. Sin embargo, no consideran necesario modificar las expresiones de diseño dada la escasa variación que observan entre ambos hormigones (5.5% en la deformación de pico [RAHA08]). Proponen, por tanto, que los cálculos sobre la seguridad estructural se extrapolen sin más a los hormigones reciclados.

La propuesta de González-Fontboa [GONZ11] vincula diversos parámetros de la curva tensión-deformación de los hormigones reciclados al porcentaje de árido natural sustituido con que se fabrique. Así, aplica un coeficiente corrector (Figura II-14 y II-1) para el módulo de deformación secante ( $\varphi$ ),  $\epsilon_{c0}$  ( $\alpha$ ), y  $\epsilon_{cu}$  ( $\beta$ ).

$$\begin{aligned}\varphi_{cm}^{rec} &= -0.0020 \times \%RCA + 1 \\ \alpha_c^{rec} &= 0.0021 \times \%RCA + 1 \\ \beta_{cu}^{rec} &= 0.0022 \times \%RCA + 1\end{aligned}\tag{II-1}$$

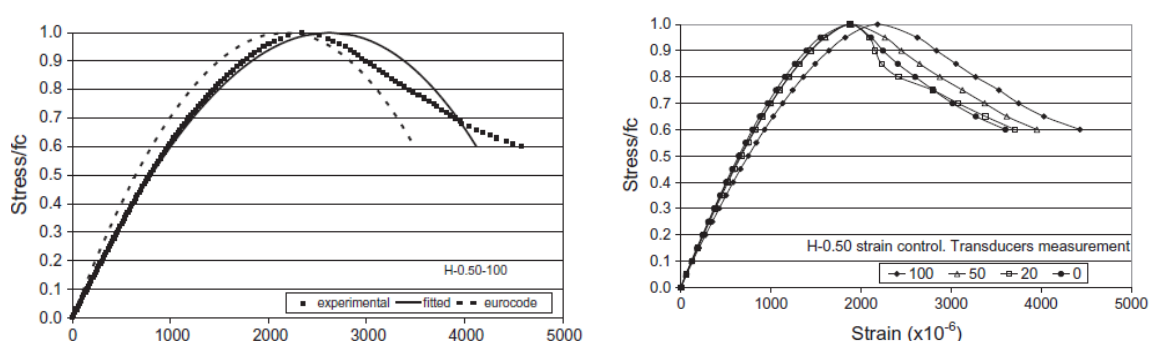


Figura II-14. Diagrama Tensión-deformación [GONZ11]

## 4.6 Fatiga

La fatiga constituye una propiedad dinámica de los hormigones cuantificada a través del límite de fatiga. Este valor responde al esfuerzo máximo unitario que aplicado un número indefinido de veces no produce daños estructurales en el hormigón.

Thomas et al. [THOM14] concluye en su investigación que el árido reciclado afecta más a la fatiga del hormigón que a las propiedades estáticas (resistencia a compresión). La respuesta dinámica del hormigón depende no sólo de la calidad del árido reciclado sino también de la calidad del nuevo hormigón. La sustitución de árido natural por árido reciclado tiende a reducir más el límite de fatiga cuanto mayor es la resistencia y el propio límite de fatiga del hormigón de control convencional. En contraste, cuando la resistencia o el límite de fatiga del hormigón de control son similares a los del hormigón original del cual procede el árido reciclado, la reducción se minimiza. Para resistencias a compresión del hormigón de control menores que las del hormigón de origen, los procesos de fatiga



están gobernados por las características de la pasta de cemento y el árido reciclado tiene menor influencia en el comportamiento a fatiga. Sin embargo, cuando el nuevo hormigón es más resistente que el hormigón original, el daño por fatiga ocurre en el árido reciclado y se incrementa en gran medida con el porcentaje de sustitución.

La incorporación del 100% de árido reciclado puede suponer una pérdida en el límite a fatiga del 30%. En el caso de un porcentaje de sustitución del 20%, la pérdida se mitiga siendo aproximadamente del 10% [CLEA11].

Se ha observado la necesidad de seguir investigando en este campo para conocer mejor el comportamiento a la fatiga del hormigón reciclado y facilitar así un diseño fiable de estructuras sometidas a cargas cíclicas.

## 4.7 Daño y cansancio

El daño puede definirse como la degradación que un punto material, una probeta o una estructura ha sufrido a consecuencia de la carga aplicada. Se adopta aquí en el sentido de la mecánica de medios continuos, asociado a la disminución de resistencia última por la creación y desarrollo de discontinuidades en los medios sólidos, que en el caso del hormigón se deben principalmente al deterioro de la interfaz entre la pasta y los áridos. El cansancio, forma de referirse a la pérdida de resistencia causada por la aplicación sostenida de una tensión inferior a la máxima, es una manifestación del daño que sufre el hormigón cuando esa tensión es elevada.

Para cuantificar el daño pueden usarse dos métodos similares en sus resultados: el scalar damage mechanics y la evolución de las deformaciones volumétricas [GONZ11]. Cuando el ensayo a compresión de una probeta de hormigón se realiza por control de carga, los valores máximos de deformación volumétrica se incrementan al aumentar el porcentaje de árido reciclado. Sin embargo, si el control es por deformación los valores máximos disminuyen. La tensión crítica, tanto en control por carga como en control por deformación, disminuye a medida que se aumenta el porcentaje de árido reciclado.

El estudio de las curvas de daño indica que, para cualquier valor de tensión, el daño se incrementa al crecer el porcentaje de sustitución de árido natural por reciclado. También lo hacen los valores de daño para la máxima tensión (máximos valores de daño). Los hormigones con una relación agua/cemento mayor presentan mayores valores de daño que aquellos con una relación inferior (Figura II-15). En el caso de la tensión crítica, las curvas de daño y los valores de daño máximos para el hormigón con un 20% de árido grueso reciclado son similares a los hormigones convencionales.

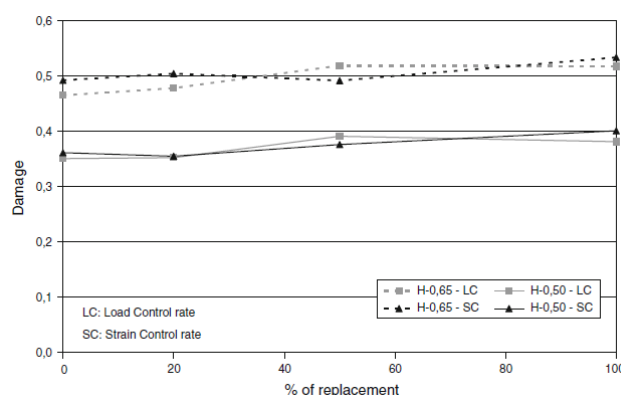


Figura II-15. Daño a tensión máxima [GONZ11]

Estudios actuales han analizado las curvas tensión-deformación volumétrica y tensión-daño en ensayos de compresión bajo carga lenta sobre hormigones reciclados con el 100% de árido grueso reciclado. De ellos se concluye que los hormigones reciclados no acusan especialmente el fenómeno de cansancio [CLEA11].

### 4.8 Retracción

#### 4.8.1 Generalidades

La retracción se produce en todos los hormigones con mayor o menor intensidad dependiendo de las condiciones de curado y la composición de aquellos. Este fenómeno se debe principalmente al movimiento de las partículas de agua en el interior del hormigón durante el proceso de curado y continua desarrollándose a lo largo de toda su vida, con variaciones cada vez menores a medida que crece la edad del hormigón.

La presencia de armadura o la existencia de apoyos en la estructura o probeta en que se evalúa este fenómeno impiden la libre deformación del hormigón dando lugar a lo que se conoce como retracción restringida o impedida (*restrained shrinkage*) [HOLT01; LI12]. La retracción será menor que la medida sobre un hormigón en el que se produzca una retracción libre (*free shrinkage*) [HOLT01], aunque genere tensiones relacionadas con la rigidez de la coacción. Por ello, las piezas de hormigón armado evidencian una deformación de retracción menor que aquellas fabricadas únicamente con hormigón en masa [GHAL02], efecto a tener en cuenta en el análisis estructural de elementos armados.

Al margen de esta división general basada en la existencia o no de restricciones en la deformación del hormigón, existen otros criterios de clasificación de la retracción, como son la edad en que se determine o la causa que la provoque.

En las últimas décadas se llevaron a cabo numerosas investigaciones [DAVI40; BAZA94; NEVI95; HOLT05; COLL06; GILB11] con el fin de determinar las deformaciones por retracción y las tensiones que producen en el interior de los hormigones identificándose así una amplia gama de factores que influyen en este fenómeno. Por una parte, las deformaciones de retracción están fuertemente condicionadas por el tipo de hormigón en que se producen, debido principalmente a la cantidad de agua con que se fabrique, el tipo de cemento empleado, la edad del propio hormigón, la presencia de armadura o la relación árido/cemento. Por otra parte, influyen también condicionantes independientes del hormigón como son las dimensiones de la pieza o probeta en que se realice la medida, la humedad a la que se exponga o el tipo de curado que se aplique.

Además de identificar los factores que condicionan la deformación por retracción, se establecieron de forma cualitativa el tipo de influencia, positiva o negativa, y el grado de afección que presentan sobre los hormigones. Es ampliamente aceptado que un aumento en la relación agua/cemento del hormigón o de la humedad a la que esté expuesto supone un incremento en la deformación por retracción [COLL06; GILB11]. Sin embargo, la presencia de armadura, la mayor edad del hormigón o un curado intenso y prolongado provocan el efecto contrario, reduciendo su valor [HOLT01; GILB11; LI12].

Otro aspecto importante a considerar es el tipo de cemento y cantidad a emplear, ya que un fraguado rápido, una elevada cantidad de pasta de cemento o la alta capacidad resistente del hormigón provocan mayor deformación por retracción [HOLT05; GILB11].

Los factores citados anteriormente presentarán mayor o menor influencia en la retracción del hormigón según las condiciones higrométricas (constantes o variables) en que se encuentre o el tipo de análisis que se realice (a corto o largo plazo). Estos últimos condicionantes supondrán, además, un criterio de clasificación de los distintos tipos de deformación por retracción.

Los distintos autores y normativas dividen la retracción en diferentes subtipos designados según el criterio de clasificación adoptado y el mayor o menor grado de detalle que se requiera para su estudio. Tras la revisión bibliográfica se ha observado una gran disparidad de subtipos y denominaciones teniendo en cuenta diferentes aspectos.

A continuación, se recogen las principales características y una breve descripción de cada uno de los tipos más ampliamente utilizados: retracción plástica, autógena y por secado.

- **Retracción plástica o capilar (plastic shrinkage):** se produce entre las 10-12 horas después del hormigonado en aquellos hormigones expuestos a condiciones ambientales con humedad inferior al 95%, en presencia de fuertes vientos o elevada temperatura. Si se dispone de un sistema de curado que proporcione la cantidad de agua necesaria para sustituir la evaporada durante el curado, este tipo de retracción no se produce.
- **Retracción autógena (autogenous shrinkage):** definida también en algunos casos como retracción química, se produce como resultado del proceso químico por el que se hidratan los diferentes componentes del cemento durante el proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón, sin que se produzca pérdida de agua. Este tipo de retracción presenta valores inferiores a los obtenidos en la de secado, por lo que puede considerarse como un efecto despreciable en el cómputo de la retracción total, a excepción de los hormigones con elevadas resistencias y alto contenido de cemento, donde su efecto sí resulta significativo.
- **Retracción por secado (drying shrinkage):** se debe a la pérdida de humedad en ambientes no saturados, producida por el efecto de hidratación del cemento y la pérdida de agua en el hormigón según las condiciones de curado en que se encuentre. En este caso, influyen en su magnitud diferentes factores como son el tipo de árido o de aditivo empleado en la fabricación de los hormigones. Una dureza elevada del árido empleado contribuye positivamente reduciendo el valor de la retracción por secado, mientras que los superplastificantes pueden conducir a diferentes comportamientos según su finalidad. Aquellos cuya función es reducir la cantidad de agua o cemento disminuyen considerablemente la retracción por secado, aunque si su objetivo es aumentar la trabajabilidad del hormigón sin reducir la cantidad de agua producen el efecto contrario y aumentan su valor. La retracción por secado, considerada en la mayor parte de los estudios realizados, constituye habitualmente la componente principal de la deformación por retracción total de un hormigón expuesto a humedades relativas por debajo del punto de saturación del ambiente [BAZA94].

Además de los términos más comunes definidos anteriormente, aparecen en algunos casos subtipos o conceptos adicionales que pretenden reflejar un fenómeno específico o el desarrollo de la retracción en condiciones ambientales concretas. Entre ellos se encuentran la retracción térmica, por carbonatación, la auto-desección o el hinchamiento.

- **Retracción térmica (thermal shrinkage):** se define como una dilatación térmica que genera variaciones de volumen en el hormigón producidas por oscilaciones de temperatura y está directamente relacionada con las condiciones higrométricas a las que se exponga la pieza o probeta de medida. Al tratarse de un efecto térmico puede dar lugar a expansiones si se producen fuertes incrementos de temperatura, o a contracciones si la temperatura desciende bruscamente. Dentro de las variaciones térmicas juegan un papel fundamental los procesos de hidratación del cemento en las primeras horas de vida de un hormigón y durante todo el proceso de fraguado, debido al elevado calor de hidratación que generan. En este caso, tanto las dimensiones de la pieza o probeta como las condiciones ambientales de humedad y temperatura, presentan un especial interés a tener en cuenta.
- **Retracción por carbonatación (carbonation shrinkage):** deformación en el hormigón endurecido que se produce al reaccionar la pasta de cemento con la humedad y el dióxido de carbono del aire, dependiendo de la superficie de contacto de la pieza o probeta y la

edad del hormigón de estudio. Como consecuencia se produce una ligera retracción y reducciones en el pH, que afectarán especialmente a la corrosión de armaduras en hormigones armados.

- **Retracción por auto-deseccación (self-dessication):** fenómeno causado por la retracción química que se identifica como factor principal de la deformación autógena. Se produce por la hidratación de la pasta de cemento en condiciones ambientales de humedad relativa no saturada, provocando el transporte de agua desde los áridos hacia los poros de la pasta de cemento no saturados [MOUN11; JENS01]. Este término se conoce también como retracción de Le Chatelier, autor que a principios del siglo pasado (1900) la define por primera vez y constata la diferencia entre variación de volumen real y aparente.
- **Hinchamiento (swelling):** deformación que sufre el hormigón en ausencia de cargas exteriores provocando un aumento de volumen debido a un curado continuado en agua o a la absorción de agua de la pasta de cemento en un hormigón sellado.

Uno de los criterios de clasificación de la retracción puede ser, tal como se ha mencionado anteriormente, el tipo de análisis que se pretenda realizar. Siguiendo esta línea, se divide la retracción en dos grandes bloques (*Figura II-16*), a edades tempranas (early age) y a largo plazo (long term). En este análisis, se fija la separación entre ambas etapas a las 24 horas de la ejecución del hormigón de estudio [HOLT01].

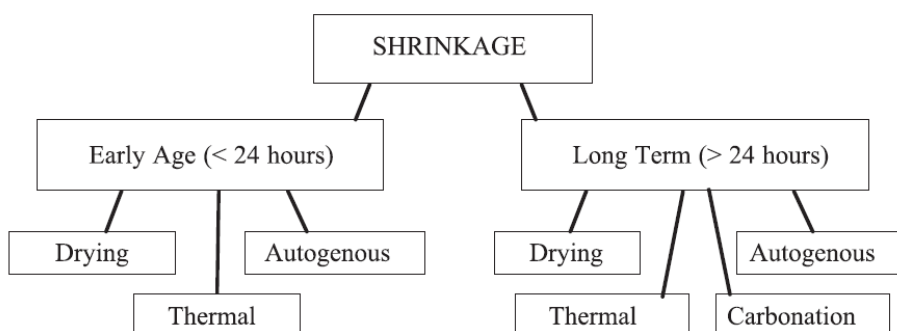


Figura II-16. Clasificación de los tipos de retracción [HOLT05]

Siguiendo esta clasificación se obtendría la retracción total del hormigón como suma de todas ellas. Sin embargo, el hecho de realizar un análisis a largo plazo permite despreciar la parte de retracción correspondiente a las primeras 24 horas, dada la pequeña magnitud de las deformaciones producidas en esa etapa inicial frente a las registradas posteriormente, en especial si se ha realizado un proceso de curado. Este tipo de estudios suelen prolongarse durante varios meses o incluso años.

Dentro de la retracción a largo plazo de un hormigón, cobra especial importancia la componente de deformación debida a la retracción por secado y autógena, cuyo valor es significativamente superior a la térmica y de carbonatación. Por este motivo, la mayor parte de los estudios centran su análisis en la retracción autógena [HOLT01; JENS01; LI12] o por secado [CORI09], cuya principal diferencia radica en si se produce o no intercambio de humedad con el ambiente.

Otra clasificación planteada para el análisis de la retracción [JENS01] es aquella que la divide en un fenómeno autógeno y no autógeno, englobando dentro de cada uno de ellos los distintos tipos de retracción previamente mencionados.

#### 4.8.2 Retracción en hormigones reciclados

Como resultado de los estudios realizados en hormigones reciclados, se observaron en ellos mayores deformaciones de retracción en comparación con las de hormigones convencionales de propiedades similares. Se atribuye esta variación, principalmente, a la mayor absorción de los áridos reciclados, a la presencia de mortero adherido y a la necesidad de emplear relaciones a/c superiores para su fabricación. A continuación se resumen algunos de los estudios más relevantes en este ámbito.

Al sustituir la fracción gruesa del árido natural por reciclado, Hasaba et al [HASA81] obtiene valores de retracción un 50% mayores que en los hormigones convencionales. Si la sustitución del árido incluye además la fracción fina, la retracción se incrementa un 70-80% respecto al hormigón de control.

Domingo et al. [DOMI10] constata a edades tempranas valores de retracción similares a los convencionales en los hormigones reciclados fabricados con porcentajes de sustitución del 20-50%, observando incrementos del 4-12% a seis meses (Figura II-17). Estas variaciones aumentan considerablemente en aquellos hormigones fabricados íntegramente con árido reciclado, alcanzando en este estudio el 70%. Sin embargo, para los mismos porcentajes de sustitución de árido grueso natural por reciclado otros trabajos presentan variaciones del 15-33% para el 50% de sustitución y del 35-49% para hormigones fabricados íntegramente con reciclado [KOU12]

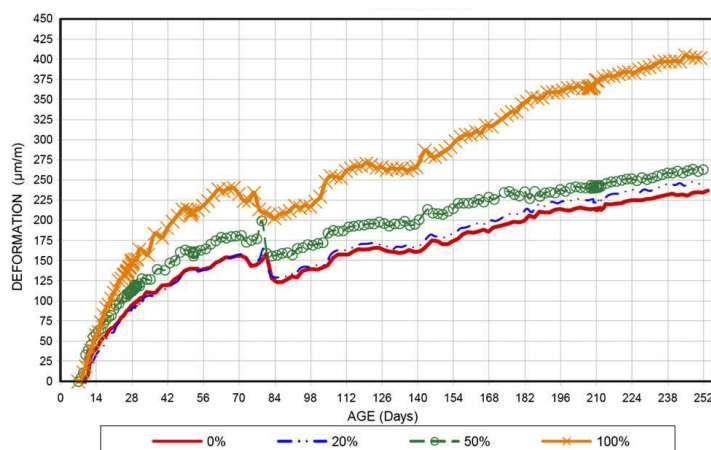


Figura II-17. Deformación de retracción en hormigones reciclados [DOMI10]

Fuji [FUJI88] obtiene incrementos del 20% en hormigones con el 100% de sustitución de la fracción gruesa, justificando esta menor incidencia del reciclado frente a otros estudios en el empleo de áridos sometidos a una trituración secundaria que disgrega el mortero adherido y consigue áridos muy similares a los naturales. Sin embargo, Sagoe-Crensil et al. [SAGO01] observa un incremento del 25% en la retracción de los hormigones reciclados frente a la obtenida en los convencionales, y atribuye dicho aumento a la menor coacción que imponen los áridos reciclados en comparación con los naturales. La mayor retracción en estos hormigones también puede atribuirse a la elevada absorción que presenta este tipo de áridos [KATZ03; RAO07; MANZ13], según se observa en la Figura II-18.

La mayoría de los autores coinciden en señalar una retracción considerablemente superior en hormigones reciclados frente a los convencionales, atribuyendo este incremento al mortero adherido, cuya presencia proporciona al árido menor coacción interna y mayor absorción. Se concluye así que tanto el contenido de mortero adherido como la absorción del árido aumentan la retracción de los hormigones reciclados, considerándose dos de los parámetros principales que condicionan su valor.

En estudios más recientes [DOMI10; COR10b] se obtienen valores prácticamente similares entre los hormigones convencionales y los reciclados con porcentajes de sustitución del 20-30%, con pequeñas variaciones en función de la relación a/c de los diferentes hormigones estudiados.

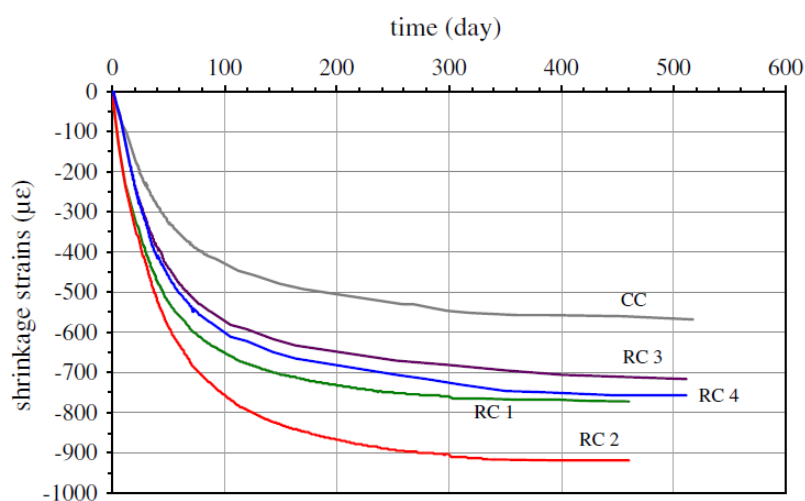


Figura II-18. Retracción en hormigones reciclados (RC) y de control (CC) [MANZ13]

Autor	a/c	Absorción (%)	%Árido reciclado	Edad de medida	Incremento de retracción (%)
Manzi et al. (2013)	0.48	7	27	460 días	35
		9	63.5		58
Kou et al. (2012)	0.55	6.22	50	112 días	33
			100		49
		5.65	50		15
			100		35
Fathifazl et al. (2011)	0.45	5.4	100	224 días	26
Corinaldesi (2010)	0.40				32
	0.45				25
	0.50	6.8	30	180 días	16
	0.55				-2
	0.60				-3
Domingo et al. (2010)	0.5	5.19	20	180 días	4
			50		12
			100		70
Yang et al. (2008)	0.55	--	50	--	22
Morohashi et al. (2007)	0.64	2.43	50	392 días	8
			100		16
	0.58	5.05	100		81
Ajdukiewicz et al. (2002)	0.41	--	100	360 días	35
					45
Sagoe-Crensil et al. (2001)	--	5.6	100	180 días	35
Fuji (1988)	--	--	100	--	20
Hasaba et al. (1981)	--	--	100	--	50

Tabla II-3. Deformación por retracción en los hormigones reciclados

Otro efecto característico de la retracción en los hormigones reciclados fabricados mediante el proceso de pre-saturación del árido es el Internal Curing. Algunos autores [COR10] coinciden en señalar un inicio tardío de la retracción en los hormigones reciclados, causado por la liberación en los áridos reciclados de parte del agua con que fueron previamente saturados.

En términos cuantitativos la retracción en los hormigones reciclados es 1.4 [WESC82], 1.5 [KARA86] o 2 veces [RAVI87] mayor que la de los hormigones convencionales.

Partiendo de las conclusiones obtenidas por diferentes estudios, la retracción en los hormigones reciclados se estima como 1.5 veces la de un hormigón convencional si sólo se sustituye la fracción gruesa, y 1.7 veces si se sustituye también la fina.

Finalmente, se incluye la *Tabla II-3* que resume los principales parámetros y resultados de los estudios sobre retracción en hormigones reciclados realizados en los últimos años.

## 4.9 Fluencia

### 4.9.1 Generalidades

La fluencia se define como la deformación del hormigón producida por el efecto de una carga constante que se prolonga en el tiempo (*Figura II-19*). Se constata que el comportamiento puede ser lineal (la deformación por fluencia provocada por una carga coincide con la suma de las deformaciones provocadas, de forma independiente, por dos cargas cuya suma sea igual a esa carga), o no lineal (no es aplicable el principio de superposición al no ser lineal la relación entre la deformación y la carga) si la tensión desarrollada por las cargas aplicadas supera el 40 ó 50% de la resistencia a compresión del hormigón [MC-10, DOMI10, GILB11].

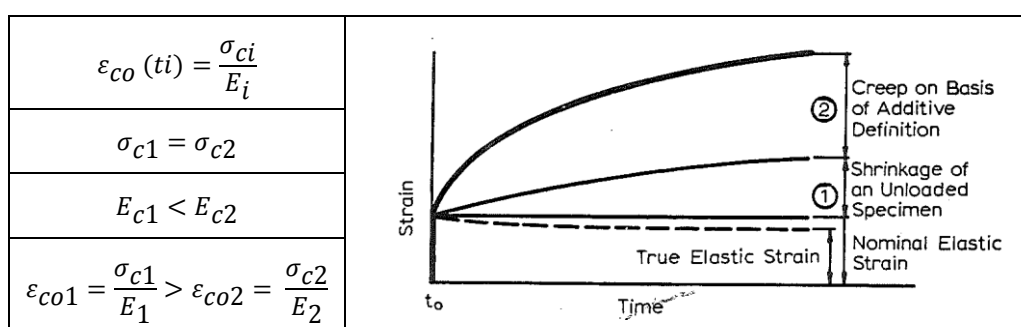


Figura II-19. Evolución temporal de las propiedades del hormigón [NEVI95]

La mayor parte de los estudios e investigaciones sobre la fluencia en el hormigón [DOMI10; FATH13] están encaminados a determinar su componente lineal, ámbito habitual en que trabajan las estructuras de hormigón y clave en el análisis en servicio de las mismas. La fluencia no lineal se asocia al daño producido por la carga en la interfaz pasta – árido, que desarrolla microfisuras y rompe su adherencia [GILB11].

Dependiendo de las consideraciones realizadas en el análisis del estudio y los objetivos del mismo se plantean diferentes parámetros que permitan establecer comparaciones entre los hormigones estudiados, en función del estado tensional al que se encuentren sometidos y de las propiedades mecánicas de los mismos, es decir, parámetros que permitan normalizar los resultados con el objetivo de que sean comparables entre sí. De esta forma, se incluyen en la mayor parte de estudios y normativas los valores de fluencia específica y coeficiente de fluencia, parámetros normalizados que facilitan la comparación entre diferentes tipos de hormigones, como puede ser el caso de hormigones convencionales y reciclados.



Resulta imprescindible, además, tener en cuenta los principales fenómenos que influyen en la fluencia y su comportamiento en el tiempo, así como los factores o condiciones en que se produce. Para ello, se resumen a continuación algunos de los efectos más destacados constatados por diferentes autores [BAZA94; NEVI95; GILB11].

1. La fluencia es menor cuanto mayor es la edad de puesta en carga. Este efecto conocido como aging o maturing, se debe a la hidratación gradual del cemento.
2. Para hormigones con un mismo contenido de agua y expuestos a temperaturas similares, la fluencia depende linealmente de la tensión que la produce y sigue el principio de superposición.
3. Las curvas de fluencia, de carácter logarítmico, muestran crecimiento de las deformaciones incluso a edades muy avanzadas, por lo que no hay evidencias de que finalmente alcancen un valor asintótico.
4. El coeficiente de Poisson debido a la deformación por fluencia es constante y similar a su valor elástico.
5. La fluencia por tracción es similar a la producida por compresión.
6. Tras la descarga del hormigón se mantiene parte de la deformación por fluencia, denominada como fluencia irreversible. La parte de deformación recuperada es menor que la predicha mediante el principio de superposición debido al efecto no lineal de la misma.
7. La recuperación de deformación por fluencia es independiente de la edad.
8. La fluencia adicional y la deformación elástica debidas a incrementos de tensión son menores que las producidas en un elemento sin carga previa.
9. La fluencia aumenta con el incremento de temperatura.
10. La fluencia disminuye con la disminución de la ratio agua/cemento.
11. La fluencia es menor cuanto mayor es la resistencia a compresión del hormigón.
12. Aunque el efecto de la edad se debe a la hidratación del cemento, los cambios en las propiedades por fluencia del hormigón son significativos incluso para hormigones de muchos años, en los cuales la hidratación del cemento o los cambios en el módulo o resistencia son despreciables. El efecto de la fluencia, aunque en menor medida, es perceptible también en hormigones de edades avanzadas.
13. La fluencia bajo cargas que superan el 40% de su capacidad máxima resistente muestra una relación no lineal con la tensión.
14. Un mayor contenido de áridos o un incremento en su tamaño máximo, así como el empleo de áridos con mayor rigidez, reducen la deformación por fluencia.

A continuación se profundiza en algunas de las cuestiones resumidas en este apartado, que afectan directamente al estudio de las deformaciones diferidas en el tiempo. Se detallan, además, los diferentes tipos de deformación por fluencia en el hormigón, tanto en carga como en descarga.

Por otra parte, al igual que la retracción, la deformación por fluencia de un hormigón se define de distinto modo según las condiciones en que se produce o el fenómeno al que pretende dar respuesta. Los principales tipos de fluencia empleados son:

- **Fluencia específica o unitaria (specific creep)**

La fluencia específica o unitaria se obtiene como la relación entre la deformación por fluencia y el estado tensional al que se encuentra sometido el hormigón. Se dispone así de valores normalizados que permiten establecer comparaciones entre la fluencia experimentada por diferentes hormigones, siendo uno de los términos más empleado en los estudios realizados sobre este tema tanto en hormigones reciclados [DOMI10] como convencionales [FATH11; DOMI10].



- **Fluencia básica (basic creep)**

Este tipo de fluencia se define como la deformación en el tiempo producida en aquellas piezas o probetas sometidas a carga constante en condiciones de equilibrio higrométrico, denominado también como ambiente medio [GILB11].

- **Fluencia por secado (drying creep)**

La fluencia por secado se produce debido a una contracción especial del hormigón por la pérdida de agua al estar sometido a una carga exterior, fenómeno conocido también como efecto Pickett en honor a quien determinó este fenómeno por primera vez [PICK42]. A partir de esta se obtiene la fluencia total ( $\epsilon_{crT}$ ), cuyo valor resulta de sumar la fluencia por secado y la deformación por fluencia medida [COLL06].

- **Fluencia en compresión (compressive creep)**

La fluencia en compresión depende de diferentes parámetros entre los que se encuentra la relación a/c empleada, la cantidad y el tipo de cemento con que se fabrica el hormigón, la humedad relativa a la que se expone, la carga aplicada, la forma y dimensiones de la pieza de análisis, la edad de puesta en carga y el tiempo que ha transcurrido desde que fue cargada.

- **Fluencia en descarga**

Este tipo de deformación se define como la recuperación de fluencia producida tras un periodo de carga constante dentro de la rama elástica del hormigón (aproximadamente hasta el 45%  $f_c$ ), cuyo valor debería ser, según el principio de superposición, similar a la producida durante la carga. Sin embargo, la redistribución de tensiones en el hormigón y el envejecimiento del material provocado por el paso del tiempo hacen que la recuperación de fluencia sea significativamente inferior en la práctica.

Este fenómeno responde a un comportamiento del hormigón cuyo efecto no puede ampararse bajo la hipótesis de material viscoelástico no lineal. Surgen, de este modo, diferentes leyes y expresiones que permiten modelizar la fluencia en descarga [YUE93; BAZA77].

- **Fluencia no lineal o terciaria**

La fluencia no lineal se puede producir en descarga, fenómeno definido previamente, o en carga, al estar sometido el hormigón a una tensión constante superior al 45% de su capacidad resistente máxima  $f_c$ .

Este tipo de deformación producida por tensiones elevadas se ve condicionada por los efectos de reblandecimiento y microfisuración en el material, apareciendo los fenómenos conocidos como adaptación y flujo [BAZA79]. Como resultado de los estudios realizados en este ámbito se recogen en las normativas actuales [MC-10; ACI-318; NTC-08] expresiones que permiten predecir su valor de forma teórica, aunque su uso en la práctica no es habitual.

Con el objetivo de definir las deformaciones de un hormigón dependientes de la tensión aplicada se define la función de fluencia ( $J(t, t_0)$ , creep compliance function), cuyo cálculo permite relacionar la deformación instantánea y de fluencia con el valor de la tensión actuante sobre un hormigón en un instante de tiempo ( $t, t_0$ ) determinado, expresando por tanto, en términos cuantitativos la deformación de un hormigón por unidad de tensión. Para ello, se emplea la ecuación (II-2) recogida por las distintas normas e instrucciones como función de fluencia.

$$\varepsilon_{cs}(t_0) = \sigma_c(t_0) \left[ \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_c} \right] = \sigma_c(t_0) J(t, t_0)$$
$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{1}{E_c} \varphi(t, t_0) \quad (II-2)$$

La primera formulación teórica de la fluencia del hormigón fue desarrollada por Powers en 1966 quien señaló la capacidad que posee el agua de transmitir altas presiones al estar ocluida en los microporos de la pasta. La fluencia se produce por una relajación de las tensiones internas al desplazarse el agua de los microporos en la que el agua está adsorbida formando pequeños meniscos, evidenciando de esta forma, la relación directa entre contenido de agua y fluencia de un hormigón.

Posteriormente, se desarrollaron numerosos estudios e investigaciones que posibilitaron la modelización teórica de este fenómeno a través de expresiones y teorías ampliamente aceptadas, que siguen vigentes en la actualidad. Algunas de las más importantes fueron la teoría endocrónica, de adaptación, de flujo y de solidificación [BAZA77, BAZA79], atribuidas a la no linealidad de la fluencia.

Sin embargo, la necesidad de establecer mecanismos sencillos de estudio para los hormigones que facilitasen el diseño en servicio de los mismos, dio lugar al desarrollo de métodos de cálculo más sencillos o simplificados para su inclusión en las normativas. Estos fueron principalmente:

- **Método del módulo efectivo:** basado en el ajuste por edad del módulo elástico del hormigón y desarrollado a partir de las teorías de Bažant [BAZA82] y el principio de aditividad de las deformaciones. En él se incluye un coeficiente de envejecimiento,  $\chi$ , y una función de relajación  $E_R$  del hormigón.
- **Método del tiempo reducido:** se desarrolla a partir del principio de superposición considerando al hormigón como un material viscoelástico en el que se incluye el fenómeno de envejecimiento. La fluencia se obtiene como la suma de tres componentes, deformación instantánea, fluencia reversible o recuperable y fluencia irreversible.
- **Método RC:** desarrollado por Dischinger en 1937, también ha sido denominado como método rate of creep. Se formula teniendo en cuenta el fenómeno de envejecimiento del hormigón y presenta un buen grado de aproximación para edades tempranas del hormigón.
- **Método RF:** desarrollado en 1965 por England e Illston se define como método rate of flow. Define la fluencia como la suma de una deformación elástica tardía (teoría de la elasticidad tardía o viscoelástica), la fluencia reversible y no reversible.
- **Método de las cadenas de Maxwell y Kelvin:** constituyen un modelo de fluencia de gran precisión basado en los desarrollos en serie de la función de fluencia. Responde al comportamiento de un material viscoelástico con envejecimiento. Estos procedimientos de cálculo requieren las propiedades reales de módulo elástico y viscosidad en los hormigones estudiados a diferentes edades, que posibiliten obtener de forma precisa la evolución del fenómeno de envejecimiento en dicho hormigón. Por otra parte, la sensibilidad que presenta a variaciones en las propiedades experimentales, difíciles de obtener o predecir con exactitud, y la complejidad de cálculo, lo convierten en una herramienta poco habitual para el diseño estructural de los hormigones.
- **Método BP-KX:** modelo de fluencia que surge a principios de los años noventa, denominado BP-KX en honor a los autores que lo desarrollaron (Bažant, Panula, Kim y Xi). Se fundamenta en la teoría de Solidificación y dispone de formulaciones abreviadas que permitieron su inclusión en las normativas americanas. Cabe destacar el modelo simplificado B3, desarrollado a partir de las expresiones del método anterior pero de menor complejidad y precisión.

Desde el punto de vista analítico es necesario mencionar las variaciones en las propiedades mecánicas de los hormigones en el tiempo, especialmente el módulo de deformación cuyo valor está directamente relacionado con la deformación inicial. Es evidente que el valor de  $E_c$  en el instante de puesta en carga ( $t_0$ ) es inferior al del instante de medida ( $t$ ),  $E_c(t_0) < E_c(t)$ . Aplicando esta relación al cálculo de la deformación instantánea en cada instante de medida, se obtiene un descenso de la misma con el paso del tiempo debido al aumento del valor de  $E_c$  [NEVI95].

Sin embargo, con el objetivo de simplificar el cálculo analítico de la fluencia, se asume la hipótesis de que el valor de la deformación instantánea es constante al igual que la tensión que la genera, a pesar de que esta deformación inicial se va reduciendo con el tiempo al incrementarse el valor del módulo y disminuir la tensión aplicada debido a la relajación que se produce en el hormigón sometido a carga constante [NEVI95].

De igual forma, es conocido que el efecto conjunto de retracción y fluencia difiere de la suma de ambas deformaciones por separado. Este fenómeno es conocido como fluencia por secado o efecto Pickett en honor al autor que lo analizó por primera vez en 1942, y evidencia que el efecto de la retracción sobre las deformaciones por fluencia tiende a incrementar su valor. El hecho de combinar retracción y fluencia bajo cargas de compresión genera en el hormigón un efecto de mayoración, que impide la aplicación directa del principio de superposición para el cálculo de la deformación diferida. Teniendo en cuenta, además, la dificultad de determinar en un valor registrado experimentalmente qué parte del mismo se debe a uno u otro fenómeno, la mayor parte de los estudios realizados en este ámbito [FATH11; MANZ13] optan por la simplificación del cálculo, considerando dicha medida experimental como deformación por fluencia, dada la baja retracción que debería producirse en una pieza de hormigón una vez superados los 28 días de edad y en condiciones higrométricas medias, sin variaciones extremas de temperatura y humedad.

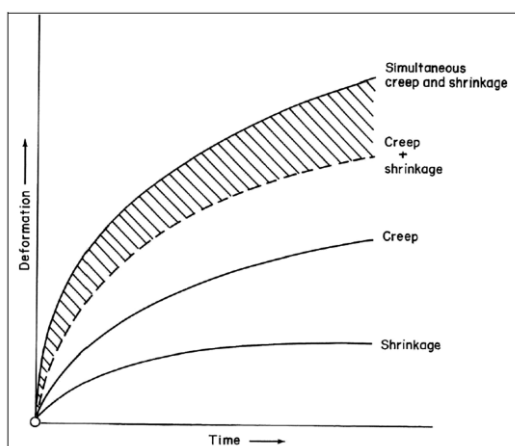


Figura II-20. Efecto conjunto de fluencia y retracción [GILB11]

Sin embargo, otro modo de conocer experimentalmente la fluencia de un hormigón bajo condiciones ambientales variables consiste en obtener la resultante de la deformación total registrada y la de retracción medida en una probeta almacenada en condiciones ambientales similares [MASA06; DOMI10].

A pesar del importante avance realizado en el estudio diferido de los hormigones estructurales, los principales referentes internacionales en este ámbito, Bažant y Neville, han manifestado en numerosas ocasiones la incertidumbre que aún perdura sobre los fenómenos de retracción y fluencia, debido a que ninguno de los modelos propuestos para el análisis a largo plazo de un hormigón ha conseguido definir por completo ambos efectos para todo el rango de variación de los factores que los producen. Cada uno de los modelos teóricos desarrollados es capaz de ajustar con

precisión el comportamiento diferido de un hormigón en las condiciones de contorno para las que se ha formulado, perdiendo precisión a medida que se producen variaciones de las mismas.

#### 4.9.2 Fluencia en hormigones reciclados

Diferentes autores [WESC82; RAVI85] obtienen valores de deformación por fluencia en hormigones reciclados entre un 30-60% mayor que en los convencionales. Se atribuye este incremento a la existencia de mortero adherido en los áridos reciclados empleados para la fabricación de los hormigones, con una relación directa entre el incremento de la fluencia y el contenido de mortero, a mayor fluencia mayor contenido de mortero adherido [WESC82].

En 1988, Nishibayashi y Yamura [NISH88] estudiaron la fluencia específica del hormigón reciclado (fluencia por unidad de tensión), obteniendo mejores resultados que en los hormigones convencionales. En este estudio se analizaron además la influencia de otras variables, como es la relación agua-cemento. A mayor relación a/c mayor fluencia del hormigón, tanto en reciclados como en hormigones de control. En este caso, ambos hormigones presentan un comportamiento similar para una misma relación a/c y nivel de carga aplicada.

En el ámbito nacional se realizaron estudios con diferentes porcentajes de sustitución del árido grueso natural por reciclado y diferentes procesos de amasado (áridos secos o saturados). De nuevo se obtuvieron conclusiones similares a las anteriores con variaciones de la fluencia específica respecto a la obtenida en los convencionales en torno al 50% [GOME02; DOMI10]. Se constata, además, una relación directa entre el valor de la fluencia y la ratio a/c real de los hormigones reciclados [GOM02; DOMI10; PELU10]. Se concluye por tanto, que las variaciones de fluencia radican en las fluctuaciones de la relación a/c producidas al introducir el árido reciclado en un hormigón; especialmente para elevados porcentajes de sustitución debido a la mayor absorción que presentan los áridos reciclados, y al proceso de amasado utilizado (Figura II-21).

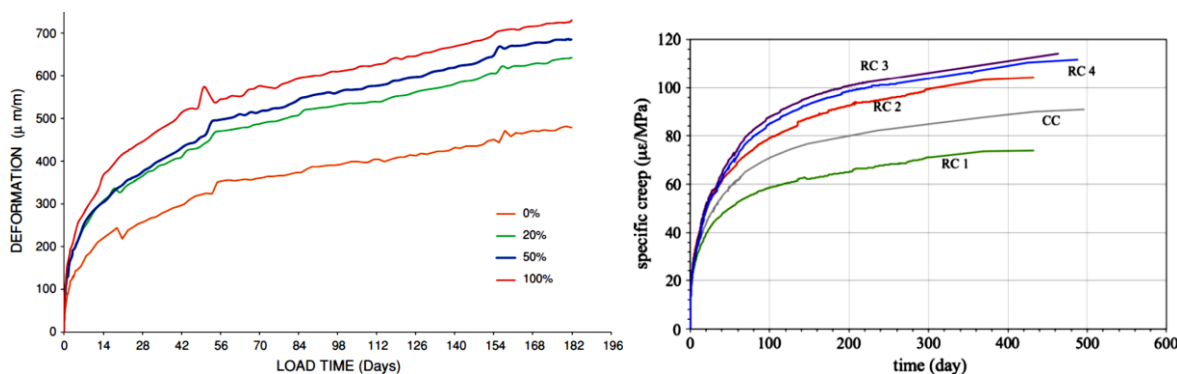


Figura II-21. Fluencia en hormigones reciclados [DOMI10; MANZ13]

Por otra parte, Masato et al. [MASA06] afirma que la fluencia en hormigones reciclados es mayor que en los convencionales sin tener en cuenta la relación a/c, y atribuye este comportamiento al contenido de pasta de cemento en el árido reciclado empleado.

Por último, se resumen en la *Tabla II-4* los principales parámetros y resultados de los estudios de fluencia sobre hormigones reciclados, realizados en el ámbito nacional e internacional.

A la vista de las diferentes aportaciones realizadas por los estudios e investigaciones sobre fluencia, se constata la necesidad de seguir estudiando el comportamiento diferido en los hormigones reciclados con el fin de llegar a una tendencia clara del comportamiento de estos hormigones bajo cargas sostenidas.

Las propiedades reológicas, retracción y fluencia, forman parte del análisis a largo plazo, de forma que permiten conocer con exactitud el estado deformacional de los hormigones reciclados en el

tiempo y contribuyen al análisis tensional y el estudio de flechas diferidas en los ensayos bajo cargas sostenidas. A partir de los coeficientes de fluencia y de las deformaciones de retracción, se inicia el estudio de flechas y deformaciones en el análisis a largo plazo.

Autor	a/c	Absorción (%)	% Árido reciclado	(t <sub>0</sub> )/(t) en días	Nivel de carga	Incremento fluencia (%)
<b>Manzi et al. (2013)</b>	0.48	7 9	27 63.5	-- / 460	30%fc	-17 (specif) 17 (specif.)
<b>Fathifazl et al. (2011)</b>	0.45	5.4	100	28 / 350	40%fc	32
<b>Domingo et al. (2010)</b>	0.5	5.19	20	-- / 162	35%fc	35/ 25 (specif.)
			50			42/ 29 (specif)
			100			51/ 32 (specif)
<b>Yang et al. (2008)</b>	0.55	--	50	--/ 480	30%fc	23
<b>Masato et al. (2006)</b>	0.40	4.8 5.4	100	--/ 500	--	44 (specif)
	0.60					31 (specif)
	0.40					56 (specif)
	0.60					25 (specif)
<b>Ajdukiewicz et al. (2002)</b>	0.41	--	100	360		-20
<b>Gómez Soberon. (2002)</b>	--	--	15	28/ 270	35%fc	5/ 8 (specif)
			30			16/ 16 (specif)
			60			32/ 37 (specif)
			100			45/ 52 (specif)
<b>Limbachiya et al. (2000)</b>	--	--	30	--/ --	--	2 y 1
			50			22 y 15
			100			33 y 65
<b>Nishibayashi et al. (1988)</b>	--	--	100	--/ 400	--	30 (c=250 kg/m <sup>3</sup> ) 50 (c=350-450 kg/m <sup>3</sup> )
<b>Ravindrarajah et al. (1987)</b>	--	--	--	--/ --	--	30 y 60

Tabla II-4. Deformación por fluencia en los hormigones reciclados. Fluencia y fluencia unitaria

## 5 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

### 5.1 Flexión

El cálculo estructural permite dar respuesta a los Estados Límite de Servicio (ELS) y Límite Último (ELU) de elementos de hormigón sometidos a cargas exteriores, con diferente finalidad en cada caso. El análisis en servicio pretende garantizar la funcionalidad de la estructura durante su vida útil verificando esencialmente los procesos de fisuración y deformabilidad, mientras que frente a estado último se debe asegurar que la probabilidad de fallo estructural queda limitada en cada una de las situaciones contempladas, sin atender a las flechas o fisuras que puedan producirse.

Los factores que presentan una mayor influencia en el comportamiento estructural para los estados límite de servicio son las solicitaciones externas, las características de hormigón y acero y la geometría construida. En los análisis del comportamiento a largo plazo aparecen en escena las propiedades reológicas del hormigón (retracción y fluencia), los tipos de cemento y áridos empleados para la fabricación del hormigón, las proporciones de la dosificación y la historia de cargas a la que estará sometida la estructura, entre otros.

Este apartado se centra describir el análisis estructural a corto y largo plazo de vigas de hormigón, resumiendo los métodos de cálculo aceptados para evaluar las flechas instantáneas y diferidas; así

como los tipos de ensayo y principales investigaciones realizadas en el ámbito de los hormigones estructurales.

En el caso concreto de los hormigones reciclados, los primeros estudios relevantes sobre el análisis estructural datan de 1988 [MUKA88] y 1993 [YAGI93]. Ambos autores realizan un estudio del comportamiento a flexión (estática y a fatiga), cortante y adherencia mediante el ensayo de vigas.

### 5.1.1 Generalidades

La predicción de las deformaciones totales de una estructura de hormigón constituye uno de los aspectos más debatidos en el diseño estructural. Para su cálculo se considera la suma de dos tipos de deformación, la producida por el efecto de una carga exterior en un momento determinado, y la que agrupa las componentes principales de fluencia y retracción (Figura II-22).

Las deformaciones por fluencia y por retracción han sido motivo de infinidad de estudios e investigaciones. Como resultado de estas actividades se han desarrollado considerables avances y se cuenta con gran cantidad de información y conocimiento sobre el tema, pero los profesionales del proyecto y el cálculo de estructuras siguen optando por el empleo de los modelos de cálculo simplificados recogidos por las normas para la estimación del comportamiento en servicio de las estructuras.

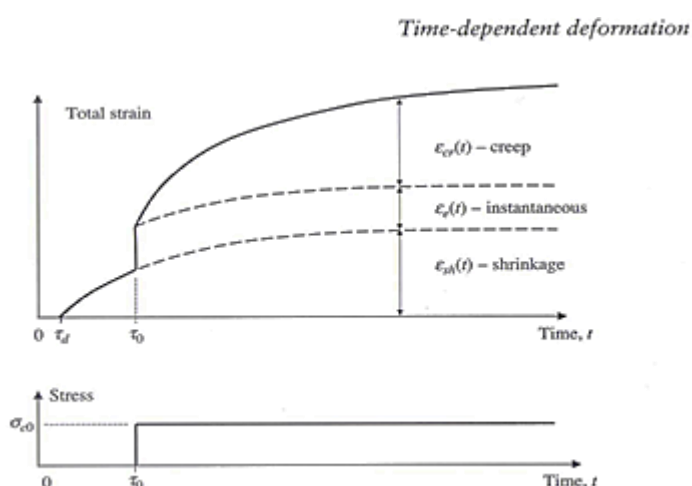


Figura II-22. Componentes de la deformación del hormigón [GILB11]

La fluencia, a diferencia de la retracción que se produce con o sin carga, depende de la tensión aplicada sobre el hormigón, por lo que se engloba dentro de las dependientes del nivel de carga, también definida en el MC-10 como deformación dependiente de la tensión actuante sobre la estructura. En la Tabla II-5 se resume la clasificación de las principales deformaciones presentes en el hormigón [ACI-318; MC-10].

Deformación del hormigón en el tiempo $\varepsilon_c(t, t_0)$	Deformación mecánica	Instantánea - $\varepsilon_0(t_0)$ Fluencia - $\varepsilon_{cr}(t, t_0)$	Dependientes de la carga (Stress dependent)
	Deformación no mecánica	Retracción - $\varepsilon_{sh}(t)$ Térmica - $\varepsilon_{T^o}(t)$	Independientes de la carga (Stress independent)

Tabla II-5. Tipos de deformación en el hormigón [DUAR10]

Existen numerosos métodos de cálculo para el estudio a largo plazo de los hormigones sometidos a una historia de tensiones determinada. La mayoría se basan en el análisis no lineal del material, tales como la Integral de Volterra, los modelos reológicos básicos o los modelos visco-elásticos.

Sin embargo, la mayor parte de las normativas, con el fin de proponer un sistema de cálculo más accesible, asumen que las deformaciones de fluencia ( $\epsilon_{cr}(t, t_0)$ ), retracción ( $\epsilon_{sh}(t, t_0)$ ), elástica ( $\epsilon_0(t_0)$ ) y térmica ( $\epsilon_{T^a}(t, t_0)$ ) son independientes y aditivas. De esta forma, aplicando el principio de aditividad de deformaciones, se obtiene el estado deformacional de un hormigón en un instante de tiempo determinado (II-3).

$$\epsilon_c(t, t_0) = \epsilon_0(t_0) + \epsilon_{cr}(t, t_0) + \epsilon_{sh}(t, t_0) + \epsilon_{T^a}(t, t_0) \quad (II-3)$$

### 5.1.2 Flexión en hormigones reciclados

La respuesta estructural a flexión fue estudiada inicialmente por Mukai [MUKA88], quien fabrica 6 tipos de hormigón realizando incluso sustituciones del árido fino. Posteriormente, Yaghisita [YAG/93] trabaja con cuatro tipos de hormigones, un hormigón convencional (A) y tres reciclados R1, R2 y R3 (cada uno de mejor calidad que el siguiente) en los que se sustituye el 100% del árido grueso por árido reciclado.

Yagishita [YAG/93] analiza los mapas de fisuras obtenidos en las diferentes vigas durante el ensayo, la respuesta a flexión bajo cargas de fatiga, el comportamiento deformacional de la armadura tanto longitudinal como transversal y el comportamiento adherente entre el hormigón y el acero. Tras los ensayos concluye que el comportamiento a flexión apenas presenta diferencias entre los hormigones reciclados y los convencionales.

Mukai [MUKA88] obtiene momentos últimos a flexión similares a los previstos en las distintas normativas. Esta tendencia desaparece al comparar los momentos de fisuración y las deformaciones bajo carga sostenida, que se ven acentuadas para el 100% de sustitución. En cuanto a las flechas bajo cargas sostenidas se detecta un incremento de las mismas a medida que aumenta el porcentaje de sustitución.

Como conclusión, ambos estudios coinciden en afirmar que la flecha instantánea tras cargas de fatiga aumenta mientras que el momento último no disminuye (Figura II-23 y Figura II-24).

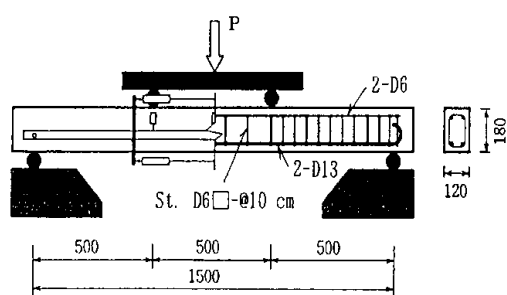


Figura II-23. Ensayo a flexión [YAG/93]

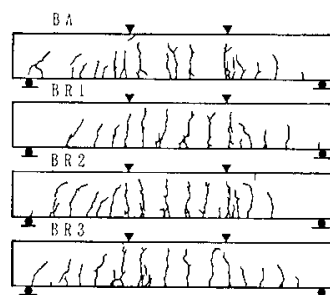


Figura II-24. Fisuración para una flecha de 20mm [YAG/93]

En 2006, Masato et al [MASA06] realiza un estudio sobre áridos reciclados de baja calidad con los que fabrica vigas para su ensayo a flexión. Obtiene como conclusión que el momento de fisuración en el hormigón reciclado es ligeramente inferior que en el convencional y, dada la ausencia de puntos singulares, emplea expresiones convencionales para el cálculo a flexión. En cuanto a las deformaciones, la fibra más comprimida llega casi a 3500 microdeformaciones, valor asociado al cálculo de la resistencia última.

En 2007, Sato [SATO07] desarrolla un plan de ensayos para analizar el comportamiento deformacional (fisuración, retracción y fluencia) bajo cargas de flexión en vigas de hormigón reciclado (Figura II-25).

El estudio concluye que los hormigones reciclados presentan valores de flecha mayores que los convencionales para el mismo momento flector y la misma relación  $a/c$  (Figura II-26). En cuanto al ancho de fisura, no se aprecian diferencias significativas entre los hormigones reciclados y los de control. Respecto al momento último, apenas presenta diferencias entre los hormigones convencionales y los reciclados.

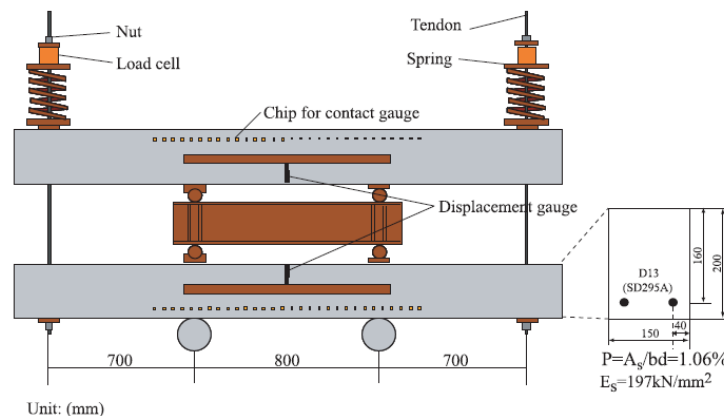


Figura II-25. Esquema de ensayo [SATO07]

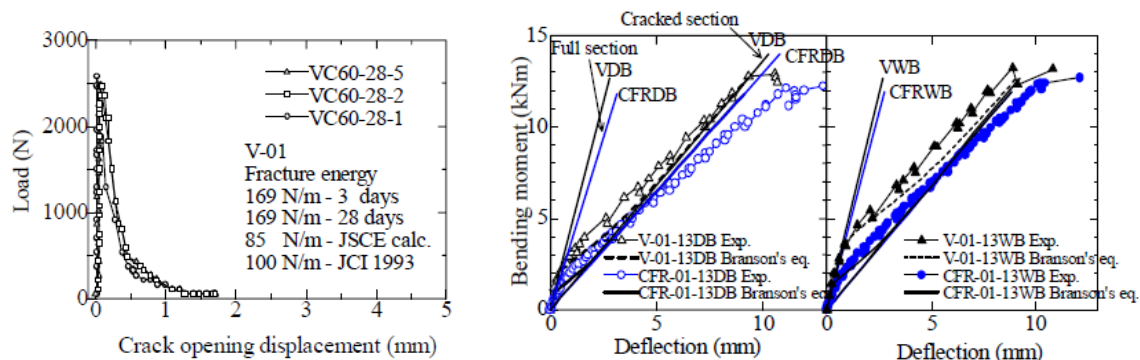


Figura II-26. Resultados del ensayo de Sato [SATO07]

Los escasos estudios realizados sobre las deformaciones en el tiempo de los hormigones reciclados apuntan a un incremento de la fluencia y la retracción a medida que aumenta el porcentaje de sustitución del árido reciclado [DOMI09; FATH13]. Este efecto se mantiene cuando se realizan estudios de flechas a largo plazo, en los que también se obtienen mayores flechas diferidas con los hormigones reciclados que con los convencionales [CHOI13].

Resultan de sumo interés, aunque desarrollados con otro propósito, los ensayos diseñados por Serrá [SERR94] para el estudio del comportamiento a flexión a largo plazo de los hormigones (Figura II-27).

Entre los parámetros a tener en cuenta en este tipo de estudio se encuentra el nivel de tensión a aplicar en cada caso. Este no debe exceder del 40% de la resistencia máxima a compresión del hormigón si se pretende estudiar la fluencia lineal del mismo.



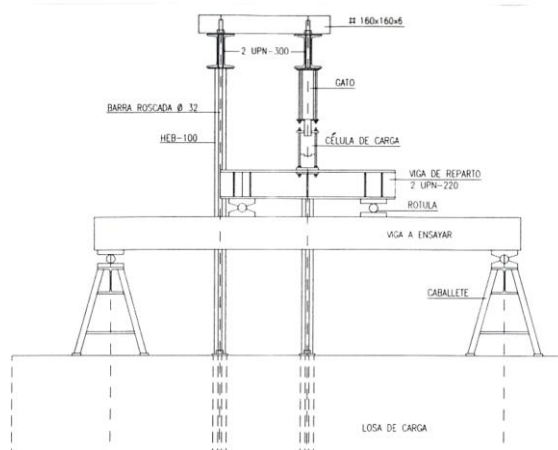


Figura II-27. Esquema de ensayo para vigas bajo carga sostenida [SERR94]

Actualmente se siguen desarrollando estudios estructurales de los hormigones reciclados, especialmente en el ámbito de las deformaciones en el tiempo, retracción y fluencia, ya que constituyen uno de los aspectos menos conocido del hormigón reciclado. A pesar de existir cierto número de trabajos sobre este tema, no existe aún un modelo aceptado del comportamiento diferido del hormigón reciclado.

## 5.2 Cortante

La resistencia a cortante muestra una considerable disparidad de resultados cuando se emplean áridos reciclados para la ejecución de los hormigones. Algunos autores [HANS83] constatan porcentajes de disminución de la resistencia a cortante del 32% en hormigones reciclados respecto a los convencionales. En cuanto al análisis de la fisuración, Yagishita [YAG93], a diferencia de los resultados obtenidos en flexión, detecta variaciones en los mapas de fisuras a cortante debido a un mayor deterioro de la adherencia del hormigón reciclado con la armadura.

Sin embargo, otros estudios [GONZ02, MARU04, CHOI10, SCHB12] coinciden en señalar un comportamiento a cortante de los hormigones reciclados similar al de los convencionales, que a pesar de mostrar ligeras pérdidas de resistencia para porcentajes de sustitución altos pueden dimensionarse a cortante mediante las expresiones normativas vigentes, sin necesidad de aplicar corrección alguna.

En Corea se desarrolló en 2008 un análisis del comportamiento a cortante de los hormigones reciclados mediante el ensayo de vigas [SANG08]. En este estudio se observan modos de fallo por fisuración que se inician por la sección central y crecen diagonalmente hacia los apoyos en los extremos de la viga. El estudio concluye que el comportamiento a cortante apenas presenta diferencias entre los hormigones reciclados y convencionales.

Entre los estudios realizados sobre vigas de hormigón reciclado se encuentra la investigación de Xiao et al. [XIAJ12], cuyos resultados muestran un descenso de la resistencia a cortante, frente a la de los hormigones convencionales, en hormigones reciclados con porcentajes de sustitución por encima del 30%. Contrariamente, Fathifal et al. [FATH09] constata un aumento de la resistencia a cortante en hormigones reciclados frente a sus correspondientes hormigones de control.

En el ámbito nacional se realizaron dos estudios pioneros centrados en el comportamiento estructural a cortante de vigas fabricadas con hormigones reciclados.

González Fonteboa [GONZ02] utiliza un hormigón convencional (HC) y un hormigón reciclado en el que se sustituye el 50% del árido grueso por árido reciclado (HR). Además utiliza un hormigón

convencional con el 8% de humo de sílice añadido (HCS) y ese mismo hormigón con árido reciclado (HRS). Con estos hormigones se fabricaron dieciséis vigas que se ensayaron hasta rotura por cortante, analizando las cargas de fisuración y plastificación para los distintos porcentajes de sustitución del árido. De esta manera, se establece una relación entre el cortante de rotura y el de fisuración, observando mayores valores de esta ratio en los hormigones reciclados que en los convencionales. Este factor es indicativo de una fisuración prematura para los hormigones reciclados en comparación con los convencionales (*Figura II-28*).

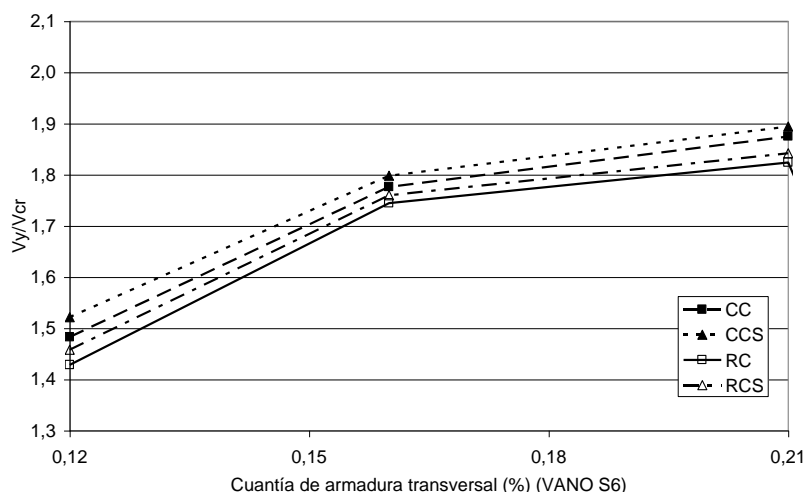


Figura II-28. Relación cortante de plastificación - cortante de fisuración en función de la cuantía de armadura transversal (vano S6) y del tipo de material [GONZ02]

Etxeberria Larrañaga [ETXE04] fabrica doce vigas, agrupadas en cuatro series de hormigón convencional (HC), hormigón con 25% de árido grueso reciclado (HR25), hormigón con 50% de árido grueso reciclado (HR50) y hormigón cuyo árido grueso es 100% reciclado (HR100). Plantea tres diferentes cuantías de armadura transversal, ensayándose las vigas hasta rotura por cortante. Este estudio apunta pequeñas diferencias en rotura, que se incrementan notablemente al analizar la fisuración: a mayores porcentajes de sustitución se observan menores cargas de fisuración.

## 6 ADHERENCIA CON ARMADURAS PASIVAS

### 6.1 Generalidades

El hormigón armado, entendiendo como tal el material formado por hormigón y acero en forma de barras, está presente en la práctica totalidad de las construcciones que se realizan tanto en obra civil como en edificación. La adherencia y el anclaje entre el hormigón y las barras de acero es una base fundamental del correcto funcionamiento del hormigón estructural, por lo que resulta imprescindible conocer la interacción entre ambos materiales a fin de garantizar su empleo en estructuras de hormigón armado y dotar al proyectista de pautas para su proyecto.

La adherencia en las zonas de anclaje está controlada por numerosos factores que dependen, esencialmente, de las propiedades de las barras de acero y del hormigón que las rodea.

Las propiedades mecánicas y características, tanto del hormigón como del acero, son determinantes para el comportamiento adherente de los hormigones, reciclados o convencionales, según los estudios realizados por diferentes autores.

- **Influencia de las propiedades mecánicas del hormigón**

La mayor o menor resistencia mecánica del hormigón que circunda la barra de acero condiciona en gran medida el comportamiento adherente entre ambos, siendo uno de los principales parámetros a considerar en el análisis de la tensión adherente con armaduras pasivas.

Los estudios realizados en los últimos años sobre este tema se han dirigido a cuantificar la tensión adherente y relacionarla con la resistencia a compresión del hormigón. Esta relación puede abordarse siguiendo alguna de las dos líneas principales: la que apuesta por la normalización de la tensión adherente mediante la raíz cuadrada de la resistencia a compresión, o la que establece una función lineal entre ambas.

1. Relación con la raíz cuadrada de la resistencia a compresión del hormigón

El Instituto Eduardo Torroja concluye, tras analizar los resultados de 4000 ensayos beam-test, que la tensión de adherencia depende con buena aproximación de  $(f_c)^\alpha$ , donde  $f_c$  es la resistencia a compresión del hormigón y  $\alpha$  un factor que toma el valor 0.5 para hormigones de resistencia superior a 25 MPa [ACHE00], rango en el que se engloban los hormigones estructurales objeto de estudio.

Numerosos autores [MOLI04; FORO08; KHAN08] han empleado posteriormente en sus investigaciones la raíz cuadrada de la resistencia a compresión como parámetro para normalizar la tensión adherente. De esta forma se obtiene la tensión relativa o normalizada de adherencia de un hormigón con independencia de su resistencia a compresión; hecho que permite establecer comparaciones entre hormigones de diferentes características o incluso analizar la influencia de otras variables, como sería el empleo de hormigón autocompactante, ligero o reciclado frente a los convencionales.

2. Relación lineal con la resistencia a compresión del hormigón

La tensión adherente también puede ser normalizada suponiendo una relación lineal con la resistencia a compresión del hormigón [DEHN00; ALME08; HAKA12]. Esta opción es la más adecuada para aquellos estudios en los que los resultados muestran una dependencia directa de la resistencia del hormigón. En este caso, el parámetro o tensión de adherencia normalizada sería  $\tau_b/f_c$ .

3. Tratamiento en códigos y normativas

La Instrucción española [EHE-08] ampara su formulación de la longitud de anclaje en el cumplimiento de valores mínimos de la tensión adherente, dependientes sólo del diámetro de la barra y no de la resistencia del hormigón, según el ensayo beam-test. Alternativamente permite la línea de cálculo propugnada por el Eurocódigo 2 [EC-2] si las barras presentan un adecuado índice de corrugas  $f_R$ . Cuando ello ocurre, la tensión adherente depende de la resistencia a tracción del hormigón y desde ese valor se formula la longitud de anclaje.

Otras normativas internacionales [MC-10; ACI-318] proponen expresiones que permiten predecir la tensión adherente a partir de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión del hormigón. El Código Modelo [MC-10], además, contempla la rotura a tracción del hormigón en la zona de anclaje (splitting) como factor limitador de la tensión adherente, y a ella adapta sus formulaciones de anclaje basadas en una amplia base de datos experimental.

- **Influencia del tipo de barra de acero**

Diferentes estudios demuestran la influencia que el tipo de barra empleada tiene sobre la resistencia adherente del hormigón [AJDU02; CORIO9]. Las tensiones adherentes obtenidas con barras corrugadas son muy superiores a las obtenidas con barras lisas, llegando incluso a triplicarlas en algunos casos (Figura II-29).

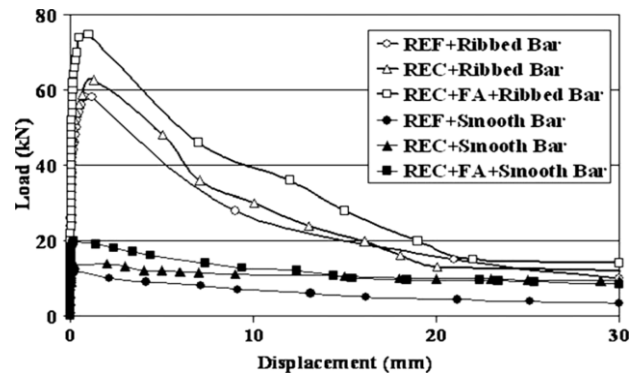


Figura II-29. Relación carga – desplazamiento obtenida por [COR109]

### • Recubrimiento

El espesor de hormigón que rodea la barra de acero resulta un parámetro fundamental en el tipo y la carga de fallo, ya que el recubrimiento ( $c$ ) condiciona el confinamiento de la barra (de diámetro  $\phi$ ). Distintos autores [MOLI04; KIM12] constatan, que el factor  $c/\phi$  representa una variable decisiva al acotar la máxima tensión adherente que es posible desarrollar antes de producirse el deslizamiento generalizado (pérdida de la adherencia) o el splitting (Figura II-30).

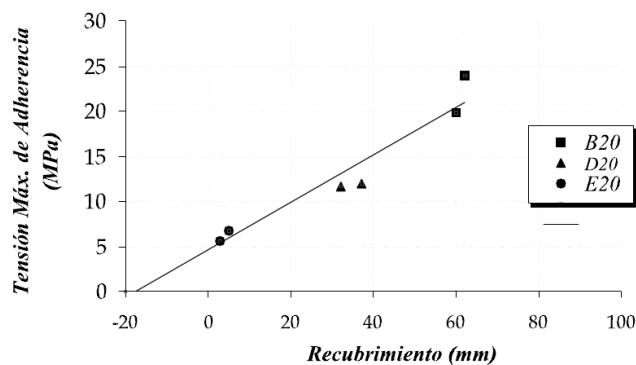


Figura II-30. Tensión adherente para diferentes recubrimientos [MOLI04]

### • Posición de la barra respecto a la dirección de hormigonado

Se distinguen dos posiciones fundamentales, catalogadas por la mayoría de autores [DEHN00; SCHU04]. La posición I, de buena adherencia, se da en las barras paralelas a la dirección de hormigonado o perpendiculares con suficiente espesor de hormigón superior. En este caso no se forman burbujas de aire que reducen la capacidad adherente, a diferencia del resto de casos que definen la posición II. Las barras en posición I suelen ofrecer tensiones de adherencia hasta un 40% superiores, aproximadamente (Figura II-31).

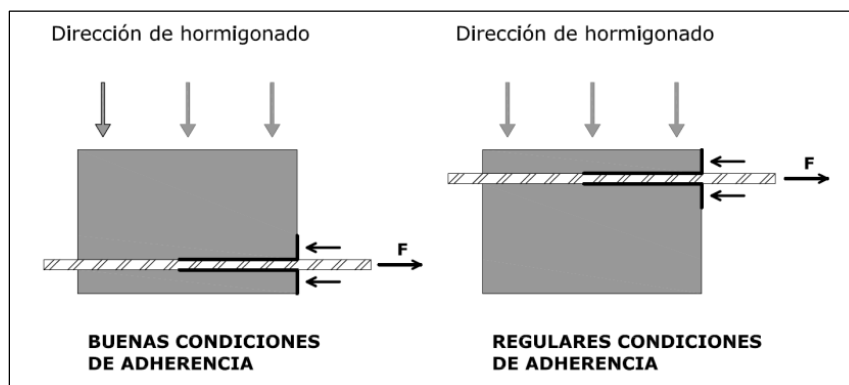


Figura II-31. Dirección de hormigonado [SCHU04]

### • Confinamiento y otros factores

Dada la importancia que tienen las tracciones circunferenciales que se generan, la existencia de barras perpendiculares a la barra ensayada aumenta la tensión de adherencia máxima y reduce la posibilidad de *splitting*. Las barras transversales y el recubrimiento son los principales factores que aportan confinamiento, factor sólo considerado indirectamente por la normativa española [EHE-08].

Otros factores, como la temperatura (Tabla II-6) o el tipo de carga aplicada (estática, dinámica, cíclica, monotónica, etc...) también modifican (Figura II-32) los resultados de los ensayos de adherencia [SERNO2; SOLO10].

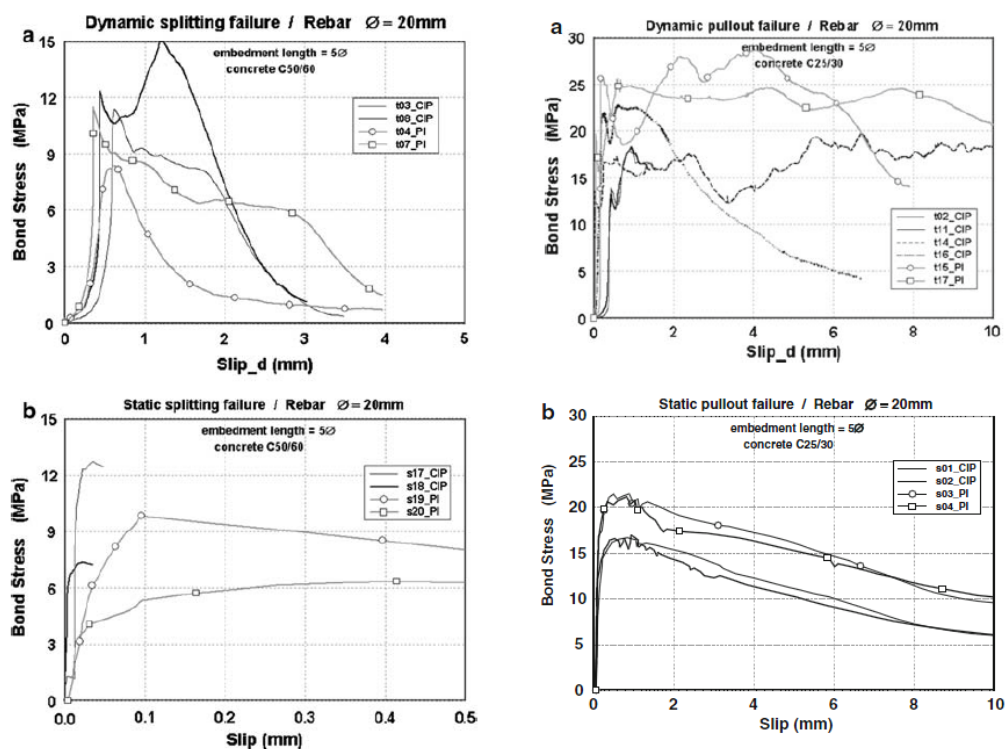


Figura II-32. Curvas tensión adherente - deslizamiento para cargas estáticas y dinámicas [SOLO10]

Edad al ensayo		24 horas			28 días		
Temperatura de curado		6°	13°	20°	6°	13°	20°
Tipo de Hormigón	PA	7,02	9,07	10,78	14,96	12,69	19,14
	FA	3,60	3,74	8,62	7,41	9,21	9,62
	HS	7,17	7,45	10,10	13,83	14,96	17,91

Tabla II-6. Tensión de adherencia en MPa para distintas temperaturas de curado [SERN02]

## 6.2 Ensayos de adherencia

Diferentes autores han desarrollado estudios sobre el comportamiento adherente siguiendo las pautas de los ensayos normativos de la RILEM (pull-out y beam-test). Por otra parte, surgen propuestas de autores para realizar ensayos de adherencia modificados [YAGI93; CAIRO3; HAKA12; KIM12].

### • Ensayo tipo pull-out

Uno de los ensayos más reveladores para visualizar y cuantificar el fenómeno de la adherencia consiste en traccionar una barra de acero embebida en hormigón, con cargas crecientes hasta provocar la rotura del espécimen o un deslizamiento generalizado (rotura tipo pull-out, según la (Figura II-33). Dicho ensayo se realiza siguiendo las recomendaciones de la RILEM [RC6-83] sobre probeta cúbica cuyo lado es igual a diez veces el diámetro de la barra.

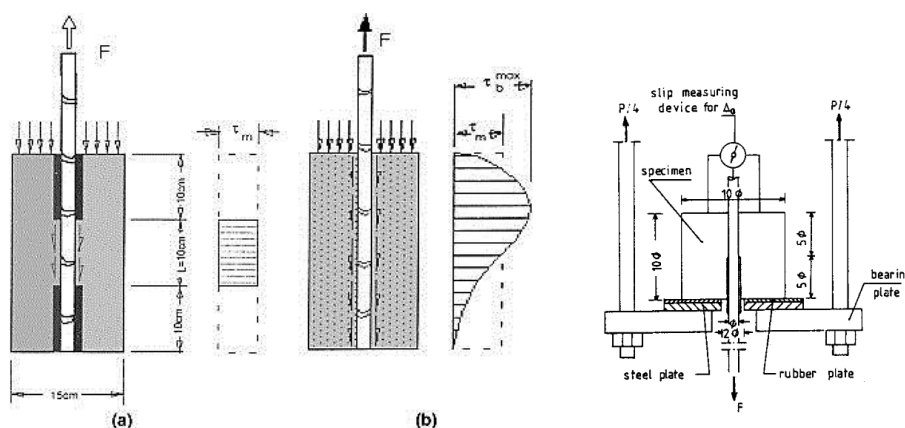


Figura II-33: Ensayo pull-out, presentado en dos variantes, en el que se reflejan las tensiones de adherencia variables en función de la disposición del ensayo

Para realizar el ensayo pull-out o de arrancamiento es necesario considerar dos zonas alrededor de la barra embebida, una sin adherencia y otra con adherencia ( $l$ ) ambas de cinco veces el diámetro de la barra ( $5\phi$ ). Se mide la carga ( $Q$ ) aplicada durante el ensayo y los correspondientes deslizamientos ( $s$ ) que experimenta la barra por su lado no cargado (Figura II-34). De esta forma, se obtienen las curvas “carga - deslizamiento” ( $Q$ - $s$ ) y las tensiones adherentes ( $\tau$ ) medias (promedio de las tensiones a deslizamientos dados) y máximas, o para un deslizamiento determinado, a través de la ecuación II-4.

$$\tau = \frac{Q}{\pi l \phi} \quad (II-4)$$

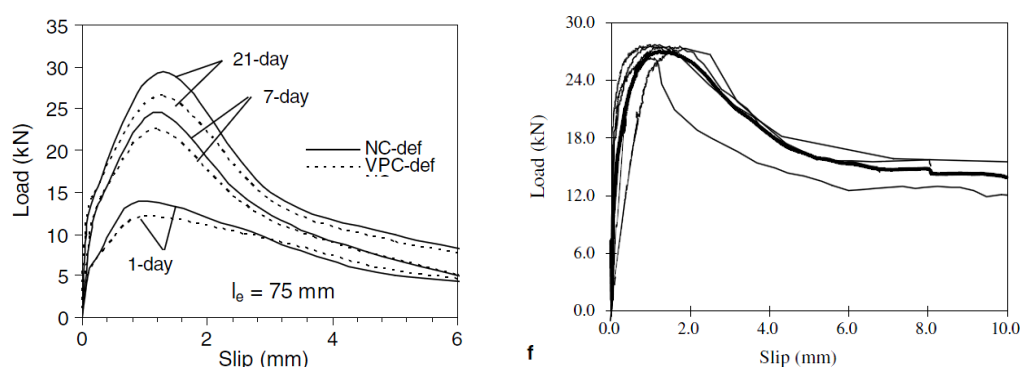


Figura II-34. Curvas carga - deslizamiento de ensayos pull-out [KHAN08; XIAO07]

### • Ensayo tipo beam test

El ensayo tipo viga, denominado en el ámbito internacional como beam-test, es el adoptado por la Instrucción Española y el Instituto Americano del Hormigón [EHE-08; ACI-318] para definir la adherencia entre hormigón y acero, además de ser el empleado en España para la homologación de las barras corrugadas.

El procedimiento de ejecución consiste en realizar un ensayo a flexión mediante dos cargas puntuales aplicadas en la zona central de una viga biapoyada simétrica separada físicamente en dos partes, tal y como refleja el esquema de la Figura II-35.

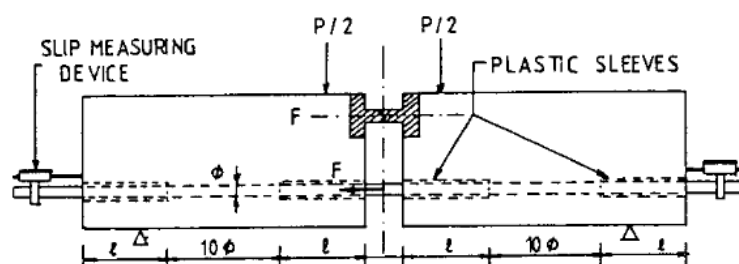


Figura II-35. Esquema del ensayo beam-test

Las condiciones adherentes de la barra están definidas, también en este caso, por una zona libre de adherencia ( $l$ ) y una parte central con adherencia, cuya longitud ha de ser diez veces el diámetro de la barra ( $10\phi$ ). La profundidad del recubrimiento de hormigón se fija en 50 mm para este ensayo por lo que, a diferencia del ensayo pull-out, la ratio recubrimiento – diámetro de la barra ( $c/\phi$ ) disminuye a medida que aumenta el valor del diámetro.

Durante el ensayo se disponen transductores de desplazamiento en los extremos para registrar el deslizamiento de la barra en cada instante de carga. A diferencia del ensayo pull-out, se obtienen dos curvas de deslizamiento respecto de una misma carga aplicada.

Algunos estudios [ALME08] constatan que los ensayos beam-test y pull-out arrojan resultados similares para un mismo tipo de hormigón, lo que sumado a la facilidad de ejecución de los ensayos por arrancamiento hacen del pull-out una opción ampliamente utilizada.

Al margen de los ensayos normalizados por la RILEM, existen infinidad de variantes propuestas por investigadores individuales, quienes a partir de los ensayos base adoptan procedimientos modificados para conocer las variables o los parámetros del comportamiento adherente que pretenden estudiar. Algunos de estos ensayos modificados se detallan a continuación.

- **Ensayo tipo transferencia**

Ensayo en el que la barra embebida en el hormigón dispone de una zona libre de adherencia en la parte central haciendo que ambos extremos de la barra se encuentren sometidos a tensiones. El principal inconveniente que presenta este sistema es la dificultad para medir las tensiones y conocer exactamente las medidas de deslizamiento de la barra. Se requerirían, en este caso, galgas extensométricas en las zonas de adherencia que permitiesen conocer el estado deformacional de la barra con la consecuente pérdida de superficie adherente que ello implicaría (*Figura II-36*).

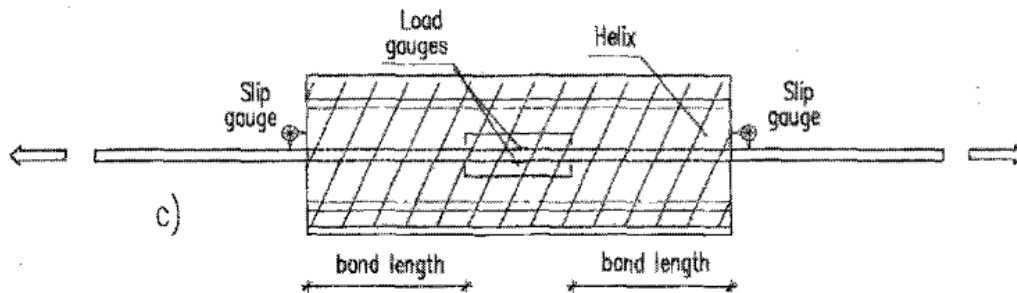


Figura II-36. Esquema de ensayo tipo transferencia [CAIR03]

- **Ensayo Schmidt-Thro**

Método de ensayo desarrollado por el alemán Gerfirend Schmidt-Thro en el año 1986. El procedimiento a seguir es similar al pull-out, con la diferencia de que la zona libre de adherencia es tres veces superior a la longitud adherente. Se dispone también un transductor en el extremo libre de la barra que permite registrar los deslizamientos de la misma durante el ensayo. La disposición de la probeta y el procedimiento de ensayo se recogen en la *Figura II-37*.

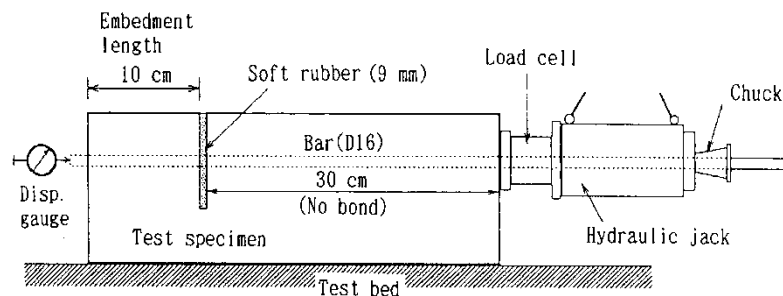


Figura II-37. Esquema de ensayo Schmidt-Thro [YAG/93]

- **Ensayo pull-out modificado**

Numerosos autores realizaron estudios de adherencia mediante ensayos modificados con el fin de analizar la influencia de distintas variables. El empleo de recubrimientos diferentes, distintas dimensiones de la probeta de ensayo y de las longitudes adherentes o libres de adherencia, son algunas de las modificaciones más habituales sobre el ensayo pull-out normalizado (*Figura II-38*).



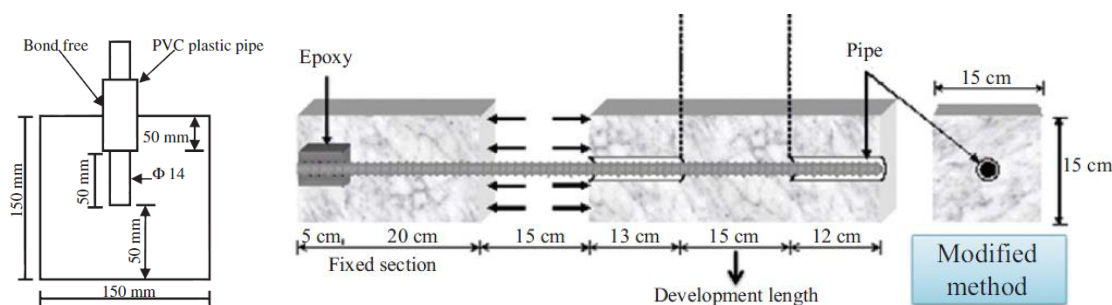


Figura II-38. Ensayos modificados de adherencia [HAKA12; KIM12]

### 6.3 Modos de fallo

Las probetas de hormigón sometidas a los ensayos detallados anteriormente pueden sufrir, principalmente, dos tipos de fallo: pull-out o splitting. El primero de ellos consiste en el fallo por arrancamiento o pull-out de la barra de acero, y el segundo se produce por la aparición de fisuras en el hormigón generando el fallo por splitting. En la *Figura II-39* y la *Figura II-40* se muestran ejemplos de los tipos de fallo indicados.

El modo de fallo de las probetas objeto de estudio puede condicionar enormemente el posterior análisis de los resultados. Como se ha dicho, este es el caso del Código Modelo 2010 [MC-10], el cual establece dos líneas diferentes para el cálculo de la tensión adherente del hormigón y de la longitud de anclaje según el modo de fallo posible.

La tensión adherente de un hormigón cuyo fallo se produce por splitting será previsiblemente inferior (*Figura II-41*) a la obtenida para un modo de fallo por arrancamiento (pull-out).

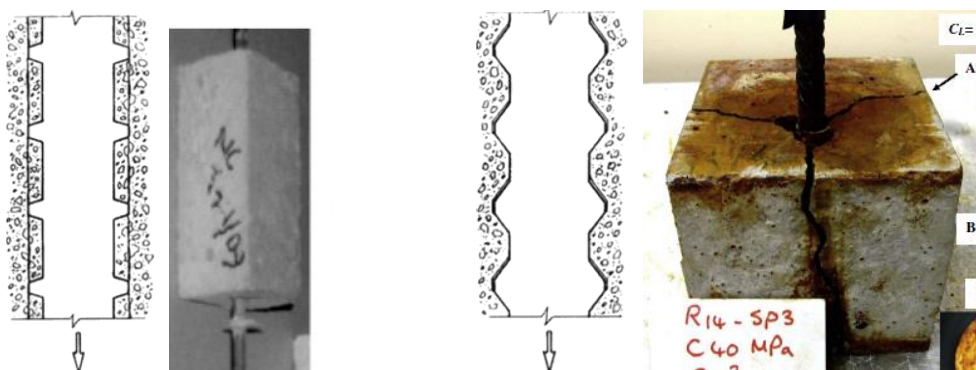


Figura II-39. Fallo por pull-out [CAIRO3; KHAN08]

Figura II-40. Fallo por splitting [CAIRO3; HAKA12]

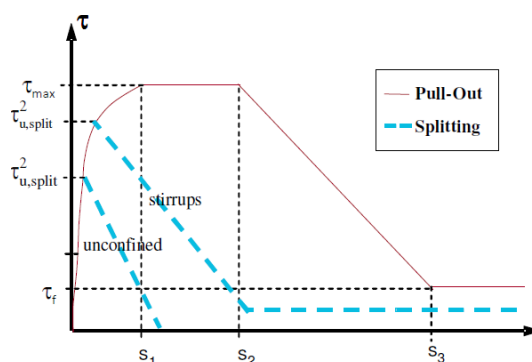


Figura II-41. Comportamiento adherente según el Código Modelo 2010 [MC-10]

## 6.4 Adherencia en el hormigón reciclado

Las propiedades mecánicas del hormigón reciclado disminuyen a medida que se incrementa el porcentaje de árido a sustituir. Este descenso en las resistencias afectará directamente al valor de la tensión adherente de ese hormigón, en el cual se prevé también una caída de la capacidad adherente a medida que se incrementa la cantidad de árido reciclado con que se fabrique, como constatan diferentes autores [BUTL11; AJDU02] en sus estudios. La mayor deformabilidad del hormigón reciclado, además, predice un mayor deslizamiento de la barra que se suma a la caída de resistencia.

Con la incorporación de árido reciclado al hormigón surge una nueva incógnita en el comportamiento adherente que se suma a las diferentes variables previamente detalladas (recubrimiento, resistencia a compresión,...). En los hormigones reciclados, la presencia de mortero adherido supone la aparición de una nueva interfase débil mortero original – mortero nuevo que, previsiblemente, repercutiría en un peor control de la fisuración y una menor resistencia a compresión [GONZ12]. Por este motivo, la tensión adherente se verá reducida a medida que disminuya la resistencia a compresión de los hormigones reciclados.

Una de las principales incógnitas que se plantea en los estudios de adherencia sobre los hormigones reciclados es diferenciar la reducción de la tensión adherente que se debe a la caída de la resistencia en los hormigones reciclados a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución, y la debida al hecho de emplear árido reciclado en lugar de natural.

Con el objetivo de determinar la influencia real del contenido de árido reciclado en el comportamiento adherente de un hormigón se recurre al cálculo de las tensiones adherentes normalizadas o relativas, cuyo valor se obtiene de la relación entre la tensión adherente y una función dependiente de la resistencia a compresión del hormigón de estudio ( $\tau_b/f_c$  o  $\tau_b/\sqrt{f_c}$ ). Diferentes investigadores han desarrollado, en los últimos años, estudios en los que se establecen comparaciones entre las tensiones adherentes normalizadas de hormigones reciclados y convencionales. A partir de los resultados obtenidos se constatan reducciones de la tensión adherente a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución (Figura II-42), aunque ésta es independiente de su resistencia a compresión [BUTL11; KIM12]. Sin embargo, no todas las campañas experimentales realizadas con hormigón reciclado arrojan los mismos resultados: en alguna de ellas no se aprecian diferencias significativas entre la tensión de adherencia obtenida con hormigones reciclados y la alcanzada con los convencionales [XIAO07], llegando incluso a detectarse un incremento de la misma (Figura II-43) con el aumento de la ratio de sustitución de árido natural por reciclado [COR109].

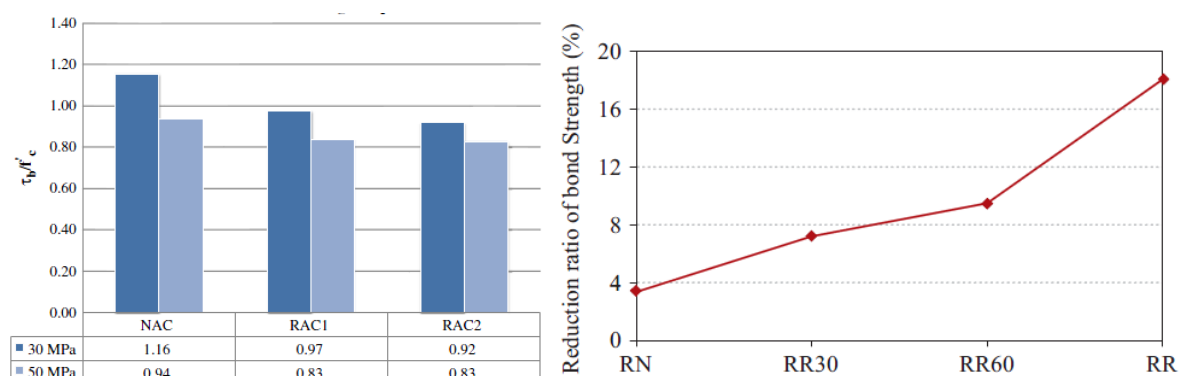


Figura II-42. Tensiones adherentes normalizadas [BUTL11; KIM12]

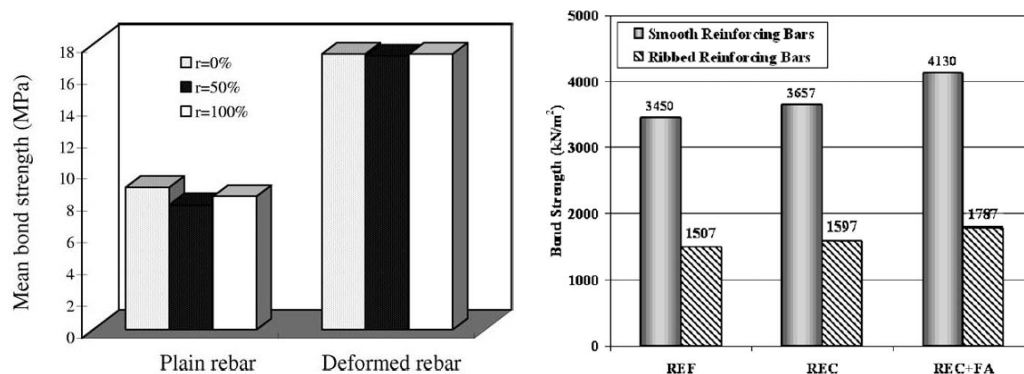


Figura II-43. Tensión adherente [XIAO07; CORI09]

Algunos autores han demostrado la influencia que el tipo de barra empleada tiene en la resistencia adherente del hormigón reciclado. Las tensiones desarrolladas con barras corrugadas son muy superiores a las medidas en barras lisas, hasta tres veces en algunos casos, tal como se constata en diversas investigaciones [AJDU02; CORI10] cuyos resultados se recogen en la *Figura II-44* y la *Figura II-45*.

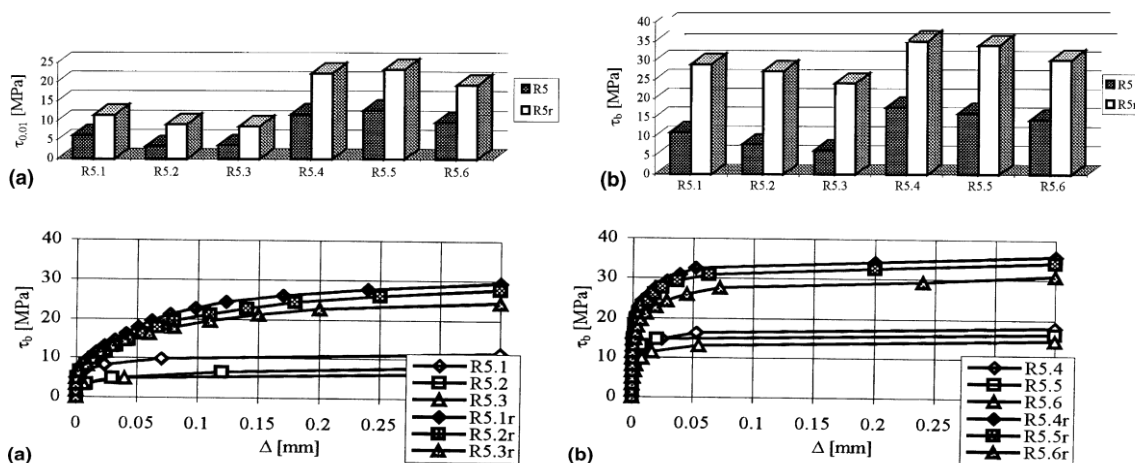


Figura II-44. Tensiones adherentes [AJDU02]

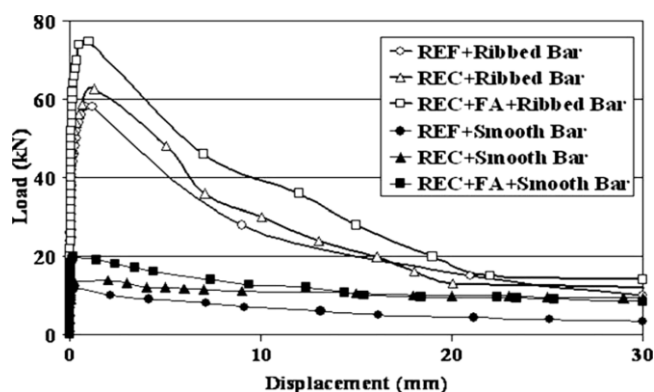


Figura II-45. Relación carga – deslizamiento [CORI09]

A la vista de la escasez de estudios sobre el comportamiento adherente [AJDU02; XIAO07; CORI09; BUTL11; KIM12], resulta esencial su estudio en los hormigones en los que se sustituye el árido

grueso convencional por reciclado en distintos porcentajes. Deben alcanzarse pautas de proyecto a incluir en las propuestas de anclaje de normativas y recomendaciones.

## 7 DURABILIDAD

La resistencia a la helada de los hormigones reciclados con porcentajes de sustitución bajos es algo menor que la de los convencionales, aunque puede mejorarse reduciendo la relación agua/cemento y utilizando aireantes [ACHE06]. En hormigón con árido grueso reciclado y un 4.5% de aire puede afirmarse que las sustituciones inferiores al 30% no comprometen la resistencia a la helada.

De Oliveira y Vázquez [OLIV96] concluyeron que la resistencia a la helada depende sensiblemente del nivel de humedad en los áridos reciclados. El peor resultado lo obtuvieron en hormigones con áridos reciclados saturados o secos, y el mejor con áridos semi-saturados debido a la formación de una interfaz más sólida y densa en estas condiciones.

La resistencia de los hormigones con árido reciclado al ataque por sulfatos depende sobre todo del tipo de cemento utilizado, así como del cemento presente en los áridos reciclados. Investigadores españoles [CLEA11] han provocado el ataque por sulfatos en hormigones reciclados con relaciones agua/cemento de 0.45 y 0.55 y con sustituciones del 20, 50 y 100% del árido grueso, demostrando que su durabilidad era independiente del empleo de árido reciclado.

Otra cuestión a estudiar en los hormigones con áridos reciclados es la reactividad potencial frente a reacciones álcali – árido. La presencia de una pasta de distinta naturaleza a la del nuevo hormigón puede influir en esta cuestión por varios motivos. En efecto, el hormigón original puede no haber desarrollado la reacción aún conteniendo árido reactivo por falta de agua o alcalinos, condiciones que sin embargo sí pueden darse en el nuevo hormigón al emplearse otro cemento y alcanzarse distinta permeabilidad.

El control de la reacción álcali-árido en hormigones con áridos reciclados es idéntico al de los hormigones convencionales en el caso de un solo origen del árido reciclado. En cambio es complejo si las fuentes son múltiples, lo que es frecuente en las plantas de reciclaje [ACHE06].

Respecto a la corrosión de armaduras, la penetración del ión cloruro tiene lugar a través del mortero nuevo, de la zona de transición entre pasta nueva y el árido reciclado, y a través del mortero viejo. Ensayos recientes confirman que la penetración de cloruros no depende de la cantidad de árido reciclado en el hormigón y sí de la relación agua/cemento de la pasta [CLEA11].

La incorporación del árido reciclado en el hormigón varía su porosidad, su capacidad de absorción y su permeabilidad [KWAN12], que pueden aumentar entre el 15% y el 70%. Cuando se utilizan además las fracciones recicladas finas la porosidad puede ser entre 1.5 y 2 veces mayor que la del hormigón de control y la permeabilidad puede duplicarse o triplicarse [ACHE06], dependiendo de la relación agua/cemento empleada. En hormigones con a/c bajas, la menor porosidad de la nueva pasta de cemento prevalece retrasando el avance de los agentes agresivos, obteniéndose un comportamiento similar para los hormigones de control y reciclados [THOM13]. Si, por el contrario, tal relación aumenta reduciéndose por tanto la resistencia a compresión del hormigón, la porosidad total se verá multiplicada [RAVI85]. Debido al mortero adherido a los áridos reciclados, los hormigones reciclados presentan mayor coeficiente de absorción que los hormigones convencionales [GONZ11].

La carbonatación del hormigón reciclado no está suficientemente evaluada todavía [SAFI13]. Existen investigadores que han obtenido una profundidad del frente de carbonatación mucho mayor en el hormigón reciclado que en el hormigón con árido natural. Sin embargo, otros autores sólo midieron pequeños incrementos [SAGO01; THOM13].

## 8 MARCO NORMATIVO DEL HORMIGÓN RECICLADO

### 8.1 Planificación y objetivos en la gestión de residuos

La actual Estrategia UE 2020 recogida en la Directiva 2008/98/CE, establece que la legislación y la política de los Estados miembros de la UE se aplicará para gestionar los residuos siguiendo el orden de prioridad que refleja la *Figura II-46*.



Figura II-46. Orden de prioridad en la aplicación de legislación y la política de residuos en la UE

En el ámbito nacional, el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015, incluye un diagnóstico de la situación de los RCD en España y presenta estimaciones sobre su evolución. Establece, como objetivos cuantitativos para el 2015, la prevención y reutilización del 20% de los residuos de construcción y demolición y el reciclaje del 40%.

En esta línea, la Ley 22/2011 del 28 de julio de residuos y suelos contaminados, que transpone al ordenamiento jurídico español la Directiva Marco de Residuos (Directiva 2008/98/CE), establece, como uno de los objetivos específicos en la gestión de los residuos, la necesidad de que el Gobierno y las autoridades competentes adopten las medidas necesarias para que antes de 2020 la cantidad de residuos no peligrosos de construcción y demolición destinados a la reutilización, el reciclado y valorización de materiales, alcance como mínimo el 70% en peso de los producidos.

La Comisión Europea encargó al BIO Intelligence Service un estudio en 2011 para realizar un análisis cuantitativo y cualitativo de la situación actual de los residuos de construcción y demolición. Según este estudio, la tasa de reciclado para la UE-27 es del 46%, estimación con un alto grado de incertidumbre por las diferencias en la definición de este tipo de materiales.

Las tasas de reciclaje varían significativamente entre unos países y otros. Mientras Dinamarca, Estonia, Alemania, Irlanda, el Reino Unido y los Países Bajos ya cumplen con el objetivo del 70% fijado por la Directiva europea, Austria, Bélgica y Lituania se acercan a éste con un 60-70% y Francia, Letonia, Luxemburgo y Eslovenia reportan tasas de reciclaje entre el 40-60%. Finalmente, España junto a Chipre, República Checa, Finlandia, Grecia, Hungría, Polonia y Portugal alcanzan porcentajes de reciclaje inferiores a la media europea, estando todos ellos por debajo del 40% (el 14% en España según este estudio).

Para los seis países restantes de la UE-27 (Bulgaria, Eslovaquia, Italia, Malta, Rumania y Suecia) en el momento del estudio no se estiman tasas de reciclaje.

### 8.2 Especificaciones técnicas

#### 8.2.1 España

Las políticas europeas en materia de residuos motivan la elaboración de la primera recomendación técnica española sobre el uso de áridos reciclados en el año 1995: "Propuesta de norma sobre la utilización de granulados procedentes del machaqueo de residuos de construcción", elaborado por

el Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya (ITeC), en colaboración con la Universitat Politècnica de Catalunya.

Desde entonces, la Administración española actualiza varios capítulos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) permitiendo usar los áridos reciclados en ciertas categorías de tráfico pesado.

En noviembre de 2002 la Comisión Permanente del Hormigón se propone la elaboración de unas recomendaciones técnicas para la utilización de RCD en hormigones con fines estructurales. Para ello constituye el Grupo de Trabajo “Hormigón Reciclado”, cuya labor desarrollada coincide con el desarrollo del proyecto RECNHOR (Estudio Prenormativo sobre la Utilización de los RCD en Hormigón Reciclado de Aplicación Estructural, financiado por el Ministerio de Medio Ambiente) y culmina con la publicación en 2006 de la Monografía “Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural” de ACHE (Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural), además de una propuesta de anejo para incluir en la revisión de la instrucción española EHE. El anejo 15 de la norma vigente en España [EHE-08] reproduce prácticamente la propuesta del grupo ponente, y fija un porcentaje máximo de sustitución del 20% del árido grueso, intervalo para el que el anejo asegura la aplicación de su articulado. Posteriormente se llevaron a cabo diferentes proyectos que continuaron las investigaciones en el ámbito de los hormigones reciclados. Entre ellos destacó el Proyecto CLEAM “Construcción Limpia, Eficaz y Amigable con el Medio Ambiente”, coordinado por el CEDEX y financiado por el CDTI, que se marcó como objetivo en este ámbito el extender hasta el 100% el rango de sustitución de árido natural por reciclado.

Como se ha dicho, el Anejo 15 de la Instrucción Española del Hormigón estructural [EHE-08] establece una serie de recomendaciones para el empleo de áridos reciclados en hormigones estructurales fijando en un 20% el máximo permitido. En el caso de hormigones no estructurales, se permiten porcentajes de sustitución de hasta el 100% tal como recoge el Anejo 18 de la EHE, que apoya y valora la contribución de este tipo de áridos a la sostenibilidad (Anejo 13).

### 8.2.2 Bélgica

Bélgica fue uno de los primeros países en poner en práctica su plan de RCD en 1995. Éste ya establecía objetivos cuantitativos para el reciclado y la recuperación de material construcción y demolición, por ejemplo la recuperación del 75% en 2000.

Sin embargo, menos del 1% de los RCD se emplean en aplicaciones de alto nivel, y el 90% de los áridos reciclados se usan en construcción de carreteras.

En cuanto a los hormigones reciclados no existe gran experiencia ni documentación en su certificación. Se aplica la legislación europea que se completa con la pre-norma belga NBN B15-001. Este reglamento permite el uso de áridos reciclados hasta un porcentaje de sustitución máximo del 20% del total de áridos gruesos, en las clases de exposición X0 y XC1, limitando la resistencia a la clase C25/30. Para otras clases de exposición y usos debe demostrarse su aplicabilidad.

Los áridos reciclados empleados deben cumplir una serie de requerimientos que deben ser ensayados, como el contenido de sulfuros o la influencia en el tiempo de fraguado del cemento. Existen dos cuerpos de certificación de los áridos: COPRO y CERTIPRO.

### 8.2.3 Países Bajos

La escasez en recursos naturales de los Países Bajos hace que el reciclaje de los RCD como áridos resulte estratégicamente importante y lo convierte en uno de los países con mayores tasas de reciclaje de toda Europa. Los documentos de referencia para la utilización de áridos reciclados son las normas NEN, especialmente las referidas a hormigón como la NEN 5905 (áridos para hormigón)



y las recomendaciones CUR 4 y CUR 5 (áridos reciclados de hormigón como áridos para hormigón y áridos reciclados cerámicos como áridos para hormigón).

Permiten el empleo de árido reciclado en hormigones de hasta 45 MPa (medido en probeta cúbica). Para conseguir una resistencia adecuada, estas recomendaciones indican que se debe utilizar un mayor contenido de cemento, 40 kg/m<sup>3</sup> más para una resistencia de 22.5 MPa y 50 kg/m<sup>3</sup> para conseguir 45 MPa. Cuando las sustituciones afectan únicamente al 20% de las fracciones gruesas no se especifican límites a la resistencia del hormigón reciclado [GERD10].

Numerosas obras en todo el país se llevaron a cabo con hormigones reciclados, como la compuerta del puerto situado en las proximidades de Almelo (1988) o las esclusas de un dique en Schijndel y otro en Nieuw Statenzijl.

#### 8.2.4 Alemania

En Alemania la propia industria de la construcción tomó la iniciativa en el año 1996 de reducir a la mitad, por compromiso voluntario, las cantidades de RCD. La industria emitió 5 informes bianuales a las autoridades, que muestran el logro de los objetivos, aunque algunos expertos entrevistados advierten que las elevadas cifras reportadas podrían no reflejar la realidad [GERD10].

Las tasas de reciclado actual se sitúan sobre el 70%, destinándose su mayor parte a construcción de carreteras y trabajos paisajísticos y de movimiento de tierras. La producción de hormigón corresponde únicamente a un 4%.

La serie de normas y estándares de calidad DIN, elaborados por el Deutsches Institut für Normung eV, establecen especificaciones para los áridos empleados sobre su granulometría, densidad, absorción, resistencia a heladas, etc. Regula hormigones reciclados de clases resistentes de C30/37, nunca para pretensados ni hormigones ligeros y siempre para su aplicación en ambientes sin humedad.

Numerosas construcciones muestran el esfuerzo para difundir este material. La primera fue un edificio de oficinas de Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU en Osnabrueck, en 1994. Recientemente se ha empleado hormigón reciclado en numerosos edificios residenciales y administrativos.

#### 8.2.5 Portugal

En junio de 2008 se aprueba el Decreto Ley núm. 46/2008, que establece el régimen de producción y uso de los RCD en Portugal. Las especificaciones proporcionan los requerimientos mínimos que el material procedente de construcción y demolición debe cumplir para ser usado como áridos de hormigones, entre otros múltiples usos.

Como áridos de hormigón estos materiales deben cumplir la directriz LNEC E 471 (Guía para el uso de material reciclado en hormigones). En ella se presenta una clasificación de los áridos, dentro del alcance de la EN12620, y se definen las propiedades mínimas.

Se prohíbe su uso si va a estar en contacto con agua, y restringe a los áridos ARB1 y ARB2 la posibilidad de sustituir a los naturales en hormigones estructurales, siempre en clases de exposición no agresivas. Se permite una sustitución de los ARB1 de hasta el 25%, alcanzando resistencias de clase C40/50; y C30/45 si se emplean ARB2 en sustituciones del 20%.

El 17 de junio 2011 una nueva legislación (Decreto Ley 73/2011) establece el uso obligatorio de al menos el 5% de materiales reciclados en la contratación de obras de construcción de conformidad con el Código de los Contratos Públicos.

Como ejemplo del empeño de las instituciones en este ámbito destaca la construcción del nuevo aeropuerto de Lisboa, que produjo un total de 15650 toneladas de RCD lográndose un 96% de reciclaje.

#### 8.2.6 Italia

Considerando que la tasa actual de reciclado se sitúa en el 10%, son necesarias nuevas políticas para adaptarse a las directivas europeas. El código ambiental “Norme in materia ambientale” (Decreto 152/2006) y el Decreto Legislativo 205/2010 de aplicación de la Directiva 2008/98 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, aproximan las normas nacionales a las europeas. Según el Comité Técnico de la RILEM, la normativa italiana introduce las limitaciones sobre el uso de áridos reciclados para hormigón mostradas en la *Tabla II-7*:

Origen del árido reciclado	Clase	% sustitución
<b>Demolición edificaciones (escombros)</b>	C8/10	Hasta 100%
<b>Demolición hormigón en masa o armado</b>	<C30/37	Hasta 30%
	<C20/25	Hasta 60%
<b>Reutilización en industrias de hormigón prefabricado certificadas</b>	<C45/55	Hasta 15%
<b>Reutilización en industrias de hormigón prefabricado certificadas &gt; C45/55</b>	Igual al hormigón de origen	Hasta 5%

Tabla II-7. Limitaciones normativa italiana

Las regulaciones no proporcionan información de las propiedades mecánicas que el hormigón reciclado puede adquirir en comparación a las de los hormigones convencionales.

#### 8.2.7 Austria

La Asociación austríaca de reciclaje de materiales de construcción emitió una serie de directrices que contienen los criterios y límites establecidos para los distintos materiales de construcción reciclados. Esta asociación otorga a las empresas que emplean estos materiales un certificado de calidad muy valorado en este país. Estas medidas suponen valiosas contribuciones para explotar el potencial del reciclaje de residuos de la construcción.

Son de aplicación además la serie de normas RVS, prescripciones técnicas generales elaboradas por la Fundación austríaca para la investigación de carreteras y transporte, y las normas ÖNORM, elaboradas por el Instituto Austríaco de Normalización.

#### 8.2.8 Suiza

El hormigón reciclado es designado en la norma suiza SN EN 206-1 como aquel con un contenido de áridos de hormigón y/o áridos de demolición mixtos de al menos un 25%, de acuerdo a las directrices de la BUWAL para el reciclaje de residuos de construcción.

Desde hace varios años los residuos de construcción y demolición mixtos y de hormigón se utilizan sobre todo a granel y como áridos para hormigón de uso no estructural. La razón es la falta de disposiciones legales y normas que regulen el uso del árido reciclado para hormigón estructural.

#### 8.2.9 América del Norte (RILEM, 2013)

El uso de hormigón reciclado se reduce prácticamente a aplicaciones no estructurales. Según el informe del US Geological Survey, 100 millones de toneladas de RDC fueron producidas en USA en el año 2000, de las cuales el 68% se empleó como base de carreteras, el 14% en rellenos, el 9%



como árido de hormigón para uso asfáltico, el 6% en hormigón convencional y el resto en otros usos. En Canadá los datos también indican que el uso de este material con fines estructurales es mínimo.

La reducida utilización de los hormigones reciclados se atribuye al uso generalizado de los áridos reciclados como base y sub-base de carreteras, y a la falta de especificaciones técnicas y guías para los controles de calidad de los productos.

#### 8.2.10 China

China es uno de los mayores consumidores de recursos y productor de residuos. Sólo la construcción de la Shanghai Expo de 2010 produjo unos 300 millones de toneladas de residuos de demolición. Además, algunos desastres naturales como el terremoto Wenchuan (2008) o Yushu (2010), han aumentado la cantidad de residuos de hormigón. Por ello se ha convertido en un problema de especial importancia en este país.

La regulación de los RDC en hormigones establece un criterio basado en el porcentaje de árido reciclado utilizado. La resistencia queda limitada a 20 MPa si todo el árido es reciclado, aumentando a 25 MPa si el árido reciclado se incorpora en un porcentaje máximo del 20%.

#### 8.2.11 Otros países

Otros países han desarrollado normativa técnica sobre la utilización de áridos reciclados que también resultan de interés.

Respecto a las normas internacionales, se observa que los requerimientos sobre los áridos reciclados en general están más definidos que los usos que con ellos pueden abordarse, particularmente los del campo del hormigón. Se hace necesaria la elaboración de una normativa específica a nivel europeo para los hormigones reciclados, que regularice y unifique criterios y limitaciones.

Según la RILEM se puede emplear una proporción de hasta un 20% de árido reciclado sin ninguna limitación en su resistencia y su aplicación, siempre que el contenido de material cerámico sea inferior al 10%.

## 9 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Esta tesis doctoral aborda el estudio de los hormigones estructurales reciclados que sustituyen distintos porcentajes de la fracción gruesa por árido reciclado (20%, 50% y 100%). Para ello se fabrican dos series de hormigón, una con relación a/c igual a 0.50 (H50), que conferirá a los hormigones resistencias elevadas, y otra igual a 0.65 con resistencias más moderadas (H65), obteniéndose así ocho tipos de hormigón denominados H50-0, H50-20, H50-50, H50-100, H65-0, H65-20, H65-50 y H65-100. Los hormigones de cada serie presentan la misma dosificación, diferenciándose, únicamente, en el tipo de árido grueso empleado: convencional, convencional y reciclado o íntegramente reciclado. El mantenimiento de la misma dosificación permite, mediante el estudio comparativo del comportamiento de los hormigones de la misma serie, conocer la influencia de la incorporación del árido grueso reciclado en todas las propiedades estudiadas.

El objetivo principal de la investigación es la caracterización de diversas propiedades, intrínsecas o estructurales, de los hormigones reciclados con un doble fin. Por un lado se pretende ampliar el conocimiento actual, y por otro ofrecer criterios de proyecto evaluando las actuales propuestas normativas, válidas sólo para hormigones convencionales, y corrigiéndolas si es preciso para adaptarlas al empleo de áridos reciclados. Del número de ensayos realizados, aun siendo notable, no podrá derivarse una formulación “exacta” de estas expresiones, al no haberse estudiado el efecto de otras variables que las modifican. Por ello, en este trabajo se admite la validez de las expresiones

existentes, proponiéndose la incorporación de un factor de corrección dependiente del porcentaje de árido reciclado empleado que consiga una aproximación equivalente en las predicciones con hormigones reciclados a la obtenida con los hormigones convencionales de la misma dosificación.

Los objetivos específicos se han estructurado en dos bloques, diferenciando los que se refieren al comportamiento del material de los que afectan al comportamiento estructural.

Los objetivos específicos respecto al comportamiento, en tanto que material de construcción, del hormigón reciclado son los siguientes:

- Conocimiento del comportamiento básico de los hormigones reciclados con distintos porcentajes de árido grueso reciclado en estado fresco y endurecido. Para ello se analizarán la consistencia y densidad del hormigón en estado fresco y la densidad y absorción en estado endurecido.
- Conocimiento del comportamiento tenso – deformacional de los hormigones reciclados con distintos porcentajes de árido grueso reciclado. Se estudiarán las resistencias mecánicas (a compresión a 7, 28, 90 y 365 días y a tracción a 28 días), y el módulo de deformación y el diagrama tensión – deformación a 28 días de edad. Se evaluará la bondad de las expresiones normativas en la estimación de la resistencia a compresión de los hormigones reciclados a diferentes edades, procediéndose de modo análogo con la resistencia a tracción, el módulo de deformación y las deformaciones de pico y última en los hormigones con árido grueso reciclado. Cuando la aproximación de las predicciones (valor teórico) a los valores experimentales difiera al aplicarse sobre hormigones convencionales y reciclados (*ratio "valor experimental / valor teórico"*) se propondrá una corrección mediante un factor que tenga en cuenta el porcentaje de árido grueso reciclado empleado.
- Conocimiento del comportamiento reológico hasta 1000 días (retracción y fluencia) de los hormigones reciclados con distintos porcentajes de árido grueso reciclado. También en este caso se evaluará la adecuación al uso de áridos gruesos reciclados de las propuestas normativas empleadas para estimar las deformaciones de retracción y fluencia. De nuevo, si la aproximación de las predicciones a los valores experimentales difiere entre hormigones convencionales y reciclados, se concretará una propuesta de corrección de los modelos normativos para ampliar su campo de aplicación. La propuesta desarrollará un factor que tenga en cuenta el porcentaje de árido grueso reciclado empleado y permita igualar las *ratios "valor experimental / valor teórico"* obtenidas en hormigones reciclados y convencionales.

Los objetivos específicos que atienden al comportamiento estructural de los hormigones reciclados son los siguientes:

- Estudio del comportamiento estructural a flexión bajo cargas incrementales hasta rotura de los hormigones reciclados con diferentes porcentajes de árido grueso reciclado. El estudio incluirá el análisis de las solicitaciones (momento de fisuración, momento de plastificación y momento máximo), de la progresión de flechas (flechas asociadas a las mencionadas solicitaciones) y, por último, del desarrollo de fisuras.
- Comparación de los resultados experimentales (solicitaciones y flechas) con los valores teóricos obtenidos utilizando las expresiones propuestas por diferentes normativas. Se evaluará la bondad de dichas expresiones para estimar solicitaciones y flechas instantáneas a través de las *ratios "valor experimental / valor teórico"* obtenidas en hormigones reciclados y convencionales. De nuevo, aceptándose la validez de las expresiones existentes, se propondrá la incorporación de un factor de corrección, dependiente del porcentaje de árido reciclado empleado, que consiga una aproximación equivalente al aplicarse sobre hormigones reciclados y convencionales.

- Estudio del comportamiento estructural a flexión bajo carga sostenida hasta 1000 días. Como en el estudio bajo cargas incrementales, se analizarán solicitaciones, deformaciones y flechas en vigas de hormigón reciclado con diferentes porcentajes de árido grueso reciclado sometidas a carga constante.
- Las flechas diferidas registradas se compararán con las estimadas según las normativas, evaluándose la bondad de las expresiones de cálculo cuando se utiliza hormigón reciclado. También en este caso se desarrollará una propuesta de corrección que tenga en cuenta el porcentaje de árido grueso reciclado empleado y permita igualar los ratios "*valor experimental / valor teórico*" obtenidas en hormigones reciclados y convencionales.
- Finalmente, se analizará el comportamiento adherente entre las armaduras y los hormigones reciclados a través ensayos pull-out que proporcionen, a diferentes edades, las tensiones de adherencia máxima y media y las curvas tensión de adherencia – deslizamiento.
- Los resultados obtenidos revelarán si es necesario corregir la forma de la curva propuesta en las normativas, así como la expresión de cálculo que estima la tensión de adherencia máxima, cuando se empleen hormigones reciclados. Aceptando la validez de las expresiones existentes, se propondrá en su caso la incorporación de un factor corrector, dependiente del porcentaje de árido reciclado empleado, que haga equivalente la aproximación de las predicciones aplicadas sobre hormigones reciclados y convencionales.



---

# III. PROGRAMA EXPERIMENTAL

---

## 1 INTRODUCCIÓN

Con el fin de abordar el estudio del comportamiento adherente y a flexión del hormigón reciclado se desarrollaron dos fases de trabajo. En la primera de ellas, denominada Fase Vigas, se realizó el análisis estructural a flexión, y en la segunda, designada Fase Adherencia, se llevaron a cabo ensayos de adherencia por arrancamiento, de tipo pull-out, sobre probeta cúbica.

En la Fase Vigas se determinó la respuesta estructural a flexión de los hormigones reciclados bajo cargas incrementales (Fase Vigas I) y bajo carga sostenida (Fase Vigas II). En esta última, los ensayos permitieron el estudio del comportamiento de los hormigones sobre vigas sometidas a cargas de servicio mantenidas durante 1000 días, y así analizar los efectos provocados por las deformaciones diferidas. Estas deformaciones se midieron, paralelamente, sobre probetas mantenidas en condiciones ambientales análogas a las de las vigas. Los resultados complementaron a los obtenidos en los ensayos a flexión bajo cargas incrementales, en los que las vigas se cargaron hasta rotura a 28 días de edad.

En la Fase Adherencia se realizó el estudio del comportamiento adherente entre los hormigones reciclados y las armaduras pasivas. Para ello, se realizaron ensayos pull-out sobre probetas de 10x10x10 cm, a 7, 28, 90 y 365 días, siguiendo las directrices de la RILEM [RC6-83].

En ambas fases se realizaron ensayos de caracterización de los hormigones, determinándose así sus propiedades físicas y mecánicas. La *Tabla III-1* resume el plan de ensayos realizado.

Ensayos estructurales		Caracterización del hormigón	
Fase Vigas	A flexión bajo cargas incrementales (Fase Vigas I)	Densidad Consistencia	Densidad y absorción
	A flexión bajo carga sostenida (Fase Vigas II)		Resistencia a compresión Resistencia a tracción Módulo de deformación Retracción Fluencia
Fase adherencia	Pull out en probetas de 10x10x10 cm		Resistencia a compresión

Tabla III-1. Plan de ensayos

## 2 HORMIGONES DE ESTUDIO

El programa experimental que se plantea está englobado dentro del proyecto de investigación CLEAM (Construcción Limpia, Eficiente y Amigable con el Medio ambiente), que, a su vez, es continuación del proyecto RECNHOR (Estudio experimental prenormativo sobre la utilización de RCDS en la aplicación de hormigón reciclado estructural), en el que participaron varias empresas, universidades y organismos coordinados por el CEDEX. Por este motivo, la selección de los materiales viene establecida por los trabajos previos desarrollados en el marco de estos proyectos.

A pesar de las pautas acordadas para el correcto desarrollo del proyecto conjunto, resultó imprescindible realizar una caracterización básica de los materiales a emplear en cada centro de investigación.

### 2.1 MATERIALES EMPLEADOS

#### 2.1.1 Cemento, agua y aditivo

Para la realización de los ensayos se ha empleado un cemento CEM-I 52.5 N/SR, suministrado por la fábrica de El Alto de Cementos Portland Valderrivas, situada en Morata de Tajuña, Madrid. Las características de este cemento según la Instrucción para la Recepción de Cementos [RC-08] se recogen en la *Tabla III-2*.

Físicas				
	Densidad	Inicio fraguado UNE-EN 196-3	Final fraguado UNE-EN 196-3	Estabilidad de volumen UNE-EN 196-3
<b>Valor</b>	3.14 t/m <sup>3</sup>	265 min	295 min	1.2 mm
<b>Límite</b>		≥ 45 min	≤ 12 horas	≤ 10 mm
Mecánicas				
	Densidad	Resistencia inicial (2 días)	Resistencia normal (28 días)	Escurecimiento
<b>Valor</b>	3.14 t/m <sup>3</sup>	31.9 MPa	62 MPa	83%
<b>Límite</b>		≥ 20 MPa	≥ 52.5 MPa	

Tabla III-2. Características del cemento CEM-I 52.5 N/SR

El agua utilizada, de acuerdo a la Instrucción Española del Hormigón Estructural [EHE-08], no debe contener ninguna sustancia perjudicial en cantidades tales que afecten a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras frente a la corrosión. En este trabajo se utilizó el agua potable de los laboratorios de construcción de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de A Coruña y del Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil - CITEEC.

Se constató, además, la necesidad de utilizar un aditivo que mejorase la trabajabilidad del hormigón. En este caso, se empleó un superplastificante de nueva generación especialmente diseñado para la fabricación de hormigones que requieran altas resistencias iniciales sin perjudicar las resistencias finales. El aditivo empleado fue el SIKAMENT 500 HE, de la marca SIKA.

El fabricante del aditivo ofrece sobrada garantía de que su comportamiento, en las proporciones previstas, no perturba las características del hormigón ni de las armaduras. Sus características son las siguientes:

- Composición química: copolímeros vinílicos modificados y agentes orgánicos minerales.
- Densidad: 1.15 kg/l
- pH: aprox. 7.5
- Contenido en sólidos: aprox. 25%
- Tiempo de almacenaje: 1 año desde fabricación.
- Dosificación habitual: entre 0.87% y el 2% en peso de cemento.

### 2.1.2 Áridos empleados. Natural y reciclado

Para la ejecución de los hormigones de estudio se emplearon áridos gruesos (AG), naturales y reciclados (AR), y arena natural como árido fino (AF). Los áridos naturales proceden del machaqueo de piedra caliza de la *Cantera Mezalocha* situada en Zaragoza; mientras que los áridos gruesos reciclados proceden de hormigón demolido y fueron suministrados por la planta de reciclaje de residuos de demolición y construcción *TEC-REC* de Madrid (*Figura III-1*).



Figura III-1. Áridos empleados. Arena, gravilla y grava naturales y árido grueso reciclado

Los resultados de la caracterización de los áridos empleados en la fabricación de los hormigones, tanto naturales como reciclados, se recogen en la *Tabla III-3*. En ella se añaden, además, los límites establecidos en España por la Instrucción del Hormigón Estructural [EHE-08] para los áridos a emplear en la fabricación de hormigones estructurales.

Todos los ensayos de caracterización se han desarrollado de acuerdo a las correspondientes normas UNE-EN, teniendo en cuenta, en el caso del árido reciclado, las recomendaciones del Anejo 15 de la EHE-08.

El análisis granulométrico indica que las fracciones utilizadas fueron 0-4 mm para la arena (0-4N), 4-12 mm para la gravilla natural (4-12N), 12-20 mm para la grava natural (8-20N) y 4-16 mm para la grava reciclada (4-16R). Cabe destacar que la curva granulométrica de la única fracción gruesa de árido reciclado empleada es equivalente a la curva conjunta de los áridos gruesos naturales (*Figura III-2*).

Para los áridos reciclados se realiza el estudio de composición de acuerdo a la norma UNE-EN 933-11 (*Figura III-3* y *Tabla III-4*), que comienza con la separación del contenido de flotantes de los no-flotantes (*Figura III-4*). Se concluye que los constituyentes principales de dicho material son los áridos y mortero adherido del hormigón de origen, confirmándose que se trata

de árido reciclado de hormigón, tal como se solicitó para esta campaña experimental. A la vista de los resultados, se considera que los áridos reciclados caracterizados son aptos para la fabricación de hormigón, ya que cumplen los requisitos establecidos por la EHE-08 [EHE-08] para este fin.

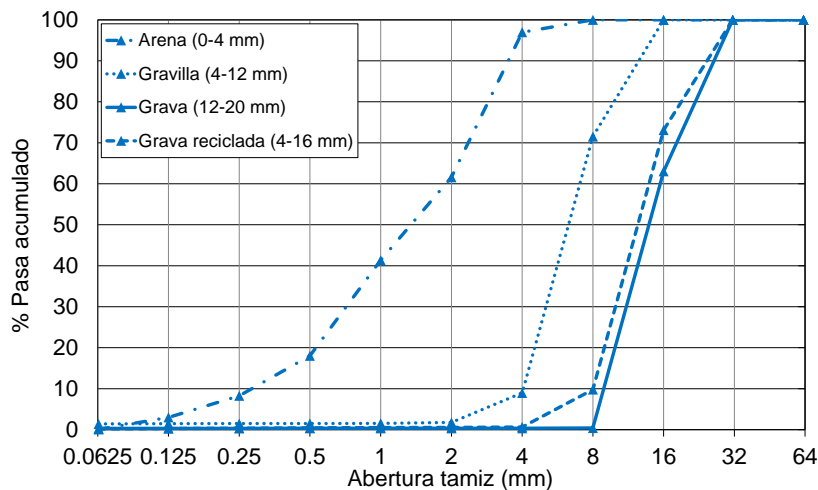


Figura III-2. Curvas granulométricas de los áridos

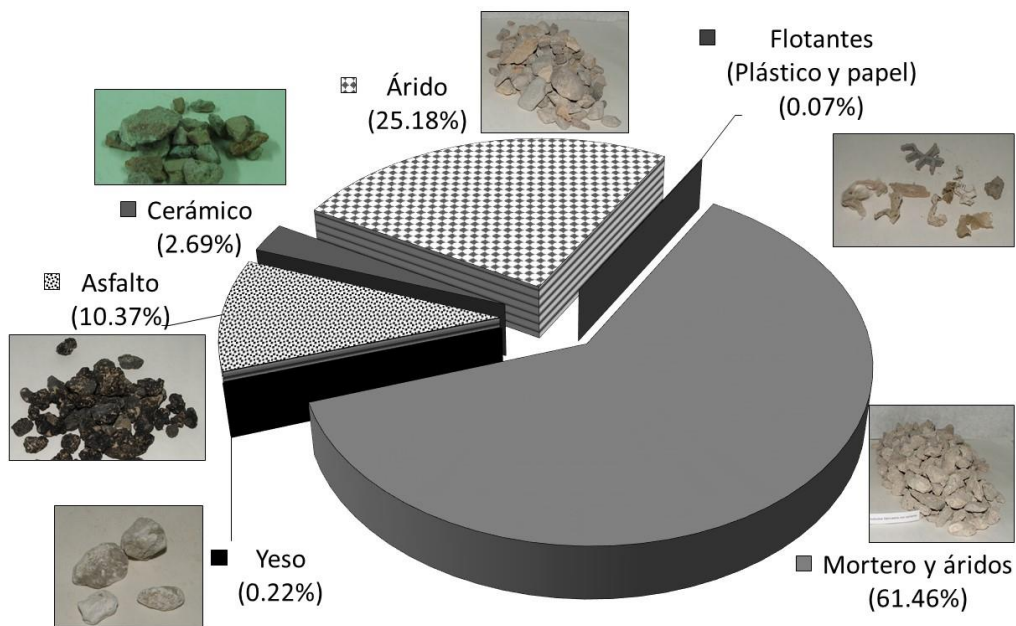


Figura III-3. Composición del árido reciclado



Figura III-4. Obtención de los no-flotantes en el ensayo de composición de los áridos reciclados



Propiedades		Arena	Gravilla	Grava	Reciclado	EHE-08
<b>Módulo granulométrico</b>		3.71	6.20	7.37	7.15	
<b>Finos</b> (UNE-EN 933-1)	(%)	11.54	1.49	0.42	0.30	<10 (AF) <1.5 (AG)
<b>Humedad</b> (UNE-EN 1097-3)	(%)	0.07	0.08	0.05	2.92	
<b>Densidad</b> (UNE-EN 1097-6)	(kg/l)	2.67	2.61	2.66	2.57	
<b>Absorción</b> (UNE-EN 1097-6)	(%)	2.22	2.20	1.33	5.40	<7 (AR)
<b>Equivalente arena</b> (UNE-EN 933-8)		64	--	2.60	--	
<b>Índice de lajas</b> (UNE-EN 933-3)		--	14.02	7.21	6.82	<35
<b>Coef. Los Ángeles</b> (UNE-EN 1097-2)		--	--	23.10	34.28	<40

Tabla III-3. Caracterización de los áridos

Denominación	Descripción	Resultados experimentales (%)		EHE-08
<b>Flotantes</b>	Plástico, papel,...	0.07		<1%
<b>R<sub>x</sub></b>	Yeso	0.22		
<b>R<sub>g</sub></b>	Cristal	0.00		
<b>R<sub>a</sub></b>	Materiales bituminosos	5.31	10.30	<1%
	Áridos con betún	4.98		
<b>R<sub>b</sub></b>	Material cerámico	2.67		<5%
<b>R<sub>u</sub></b>	Áridos redondeados	14.80	25.06	
	Áridos angulosos	10.25		
<b>R<sub>c</sub></b>	Hormigón	47.26	61.10	
	Áridos con hormigón	13.85		

Tabla III-4. Composición de los áridos reciclados (UNE-EN 933-11)

### 2.1.3 Armaduras

Las armaduras de las vigas se fabrican con barras corrugadas de acero B500SD, también empleadas en las probetas cúbicas de adherencia. Cumplen con los requisitos del artículo 31.2 de la EHE respecto a las tensiones de adherencia, según el certificado de homologación de adherencia, que ha sido aportado por la empresa suministradora, *Hierros Lois S.L.* de Carral, A Coruña.



Figura III-5. Armaduras para la Fase Vigas y barras corrugadas para la Fase Adherencia

## 2.2 DOSIFICACIONES DE LOS HORMIGONES

Se han planteado dos tipos de hormigón para realizar este estudio, uno de resistencias mecánicas elevadas y relación agua/cemento de 0.50, y otro de relación agua/cemento 0.65,

con menor capacidad resistente. De esta forma se consigue un amplio rango de estudio al analizar dos tipos de hormigón con resistencias a compresión bien diferenciadas.

En cada uno de los hormigones se sustituyó la fracción gruesa del árido natural por reciclado en porcentajes (en volumen) del 20% (máximo permitido en la EHE-08), 50% (valor intermedio) y 100% (hormigón fabricado íntegramente con árido grueso reciclado). Se obtuvieron así ocho tipos de hormigón denominados H65-0, H65-20, H65-50 H65-100, H50-0, H50-20, H50-50 y H50-100 (*Figura III-6*), indicando el primer número (50 ó 65) la serie a la que corresponde (relación a/c 0.50 ó 0.65) y el último al porcentaje de sustitución del árido grueso (0%, 20%, 50% y 100%).

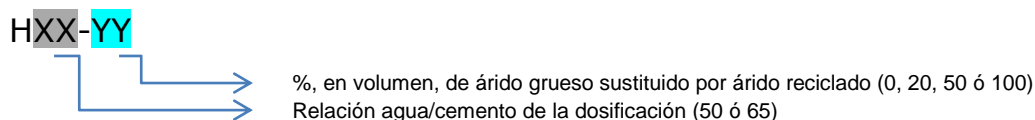


Figura III-6. Nomenclatura de los hormigones de estudio

Cada una de las series de hormigón, H65 y H50, se diseña para un tipo de ambiente. La serie H65 se diseña para la clase de exposición I, no asociada a ningún proceso de agresión (interiores de edificios no sometidos a condensaciones o elementos de hormigón armado). La serie H50 se diseña para la clase de exposición IIIa, ligada a procesos de agresión por cloruros (estructuras marinas por encima del nivel de pleamar y elementos exteriores de estructuras situadas a menos de 5 km de la línea costera). El tipo de ambiente condiciona el recubrimiento a emplear en las vigas armadas y el contenido de cemento que, finalmente, se establece en 275 kg/m<sup>3</sup> y 380 kg/m<sup>3</sup> para las series H65 y H50, respectivamente.

Para el diseño de las mezclas se empleó el ajuste de la dosificación desarrollado en el método de Faury [*FAUR58*], utilizándose los áridos reciclados saturados y teniendo en cuenta el agua incorporada por el aditivo, computada en el cálculo del agua total. En la *Tabla III-5* se recogen las dosificaciones para 1 m<sup>3</sup> de hormigón, donde se especifica la cantidad (en kg) de cemento, agua, y áridos, natural y reciclado, para cada fracción granulométrica.

La proporción de aditivo utilizada se ajustó en cada amasada sobre el peso del cemento, según las necesidades de cada hormigón a fabricar. La cantidad se estableció en un porcentaje máximo del 1.2 % del peso de cemento, con el objetivo de conseguir consistencias en todos los hormigones que permitiesen una buena trabajabilidad y una fácil colocación del hormigón en los moldes (*Figura III-7*).

(kg)	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H65-0	H65-20	H65-50	H65-100
<b>Cemento</b>	380	380	380	380	275	275	275	275
<b>Agua</b>	190	190	190	190	178.75	178.75	178.75	178.75
<b>0-4 C</b>	781.43	794.31	811.37	838.29	918.49	938.05	962.73	1005.18
<b>4-12 C</b>	307.93	237.28	140.37	0.00	457.65	350.60	205.48	0.00
<b>8-20 C</b>	665.44	512.76	303.34	0.00	486.19	372.47	218.29	0.00
<b>4-16 R</b>	0.00	187.51	443.71	807.97	0.00	180.77	423.77	756.46
<b>a/c</b>	0.50	0.50	0.50	0.50	0.65	0.65	0.65	0.65

Tabla III-5. Dosificaciones para 1 m<sup>3</sup> de hormigón



Figura III-7. Asiento en cono de Abrams

### 3 PROCESO DE AMASADO

Tal y como se constata en el *Capítulo II*, el mortero adherido en la superficie de los áridos reciclados incrementa notablemente su capacidad de absorción de agua [HANS83; NIXO87; GONZ08], lo que, sin las medidas adecuadas, reduce la cantidad de agua disponible para combinarse con el cemento. Con el objetivo de corregir este efecto se han desarrollado numerosos estudios e investigaciones, cuyas conclusiones establecen tres posibles formas de proceder:

- Añadir directamente en la amasadora una cantidad de agua adicional, calculada a partir de la absorción de los áridos reciclados [BERN09; XIAO05; POON04].
- Pre-saturar el árido reciclado antes de incorporarlo a la amasadora [ETXE07; SAGO01; NEAL98; RÜLH92].
- Añadir una cantidad de aditivo extra.

En este programa experimental se opta por pre-saturar los áridos reciclados durante 10 minutos, tiempo establecido por Nealen y Schenk [NEAL98] como suficiente para garantizar el 80% de saturación de los áridos reciclados.

#### 3.1 Pre-saturación del árido reciclado

El procedimiento de pre-saturación consiste en sumergir, inmediatamente antes de la fabricación de los hormigones, los áridos reciclados en bidones con agua durante 10 minutos, dejándolos escurrir, posteriormente, otros 10 minutos para eliminar el agua retenida superficialmente.

Para controlar el proceso, que pretende pre-saturar los áridos reciclados hasta el 80% de su capacidad de absorción, se pesan éstos transcurridos los 10 minutos de escurrimiento, comprobándose que su peso no difiere del objetivo más allá de un  $\pm 5\%$ . En caso de que este rango se exceda inferior o superiormente, se aumenta, respectivamente, el tiempo de inmersión o de escurrimiento.

Con el peso finalmente alcanzado se calcula la relación agua/cemento efectiva ( $a/c_{\text{efectiva}}$ ), término que pretende diferenciar entre el agua total de la mezcla (agua añadida, agua de humedad y agua de presaturación) y el agua efectiva, entendida ésta como la total menos la que se encuentra absorbida por los áridos reciclados (que, tal como se ha mencionado, se considera que corresponde a la calculada con el 80% de su capacidad de absorción).

El procedimiento de presaturación introdujo pequeñas diferencias en las relaciones  $a/c_{\text{efectiva}}$  de los diferentes hormigones, lo que dificultó el control de las consistencias e hizo necesario variar la proporción de aditivo de cada hormigón.



Figura III-8. Pre-saturación del árido reciclado

### 3.2 Preparación de los materiales

Todos los materiales se mantuvieron en el laboratorio durante los días previos al inicio de las amasadas. Se pesaron por separado las distintas fracciones de árido utilizadas, ensacando las cantidades necesarias de cada una de ellas para las distintas amasadas. Se siguió el mismo procedimiento para el cemento y el agua, almacenando esta última en garrafas y botellas (Figura III-9 y Figura III-10). El aditivo superplastificante se incorporó disuelto en una pequeña parte del agua de amasado al iniciarse los 2 últimos minutos de amasado.

En la Fase Vigas se fabricaron, por cada tipo de hormigón a ensayar, dos vigas gemelas de 360x20x30 cm, probetas cilíndricas de 15x30 cm y de 10x20 cm, cúbicas de 10x10x10 cm y prismáticas de 15x15x60 cm.

En la Fase Adherencia se fabricaron probetas cúbicas de 10x10x10 cm con una barra corrugada centrada en la probeta, de acuerdo al procedimiento establecido por la RILEM [RC6-83]. Además se fabricaron, al igual que en la Fase Vigas, probetas cúbicas, también de 10x10x10, para la caracterización del hormigón.



Figura III-9. Preparación del material



Figura III-10. Básculas empleadas



### 3.3 Secuencia de amasado

La central de amasado empleada dispone de una amasadora de 250 l de capacidad, situada en el laboratorio de construcción del CITEEC de la Universidad de A Coruña (*Figura III-11*).



Figura III-11. Central de amasado

El proceso de amasado siguió la misma secuencia en todas las fases experimentales del trabajo. En primer lugar se pre-saturaron los áridos reciclados y se procedió a humedecer el interior de la amasadora. Una vez realizadas estas operaciones previas, se inicia la secuencia de amasado con el vertido de los áridos reciclados pre-saturados a la hormigonera. A continuación se introducen los áridos gruesos naturales, de mayor a menor tamaño, junto con la mitad del agua a aportar para la amasada. Con el fin de conseguir una mezcla homogénea de los áridos con el agua, se aplican dos o tres giros a la amasadora. Una vez mezclados todos los áridos se incorporan la arena y el cemento, arrancando en este punto la primera parte del amasado. El tiempo de mezcla es de 3 minutos, al inicio de los cuales se incorpora la cantidad de agua restante. Posteriormente se realiza una pausa de 3 minutos, y a continuación se inicia la fase final del mezclado (2 minutos) al principio de la cual se incorpora la cantidad de aditivo fijada (*Figura III-12*).



Figura III-12. Proceso de amasado

Los tiempos de mezcla y la secuencia seguida durante el proceso de amasado se recogen en la *Tabla III-6*.

Materiales introducidos	Tiempo de mezcla
Árido reciclado pre-saturado + árido grueso + 1/2 agua total	2/3 vueltas en la amasadora
Arena + cemento + 1/2 de agua restante	3 min (el agua se añade al inicio)
Pausa	3 min
Aditivo	2 min (en los primeros 15 s)

Tabla III-6. Secuencia de amasado

## 4 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN

Los ensayos de caracterización del hormigón se realizaron de forma paralela a los estructurales de flexión y adherencia. Con ellos se pretendía conocer y definir exactamente las propiedades físicas y mecánicas de los hormigones, y determinar su influencia en la respuesta estructural de los mismos.

### 4.1 Fabricación y curado

Para la fabricación de las probetas, se llevaron a cabo las operaciones habituales de pesado de los moldes y aplicación del desencofrante.

El llenado de los moldes se realizó por vertido directo del hormigón en diferentes tongadas según las dimensiones de la probeta, compactando cada una de ellas mediante vibrador de aguja. Una vez fabricadas las probetas, se enrasaron cuidadosamente para obtener una geometría lo más regular posible (*Figura III-13*). El curado se realizó mediante una arpillera húmeda colocada sobre la superficie de las mismas (*Figura III-14*).



Figura III-13. Fabricación de las probetas



Figura III-14. Curado de las probetas en la Fase Vigas

Transcurridas 24 horas se retiró la arpillera y se procedió al desmoldado. Las probetas de la Fase Vigas se almacenaron en el laboratorio a temperatura y humedad ambiente hasta la fecha de ensayo (*Figura III-15*). Todas las probetas de la Fase Adherencia se almacenaron, tras el desmoldado, en cámara climática hasta el día de ensayo (*Figura III-16*), bajo condiciones ambientales normalizadas de 20°C de temperatura y 95% de humedad (UNE-EN 12390-2).



Figura III-15. Probetas de la Fase Vigas almacenadas en el laboratorio hasta su ensayo



Figura III-16. Curado de las probetas en la Fase Adherencia

## 4.2 Ensayos en fresco. Densidad y consistencia

En ambas fases del programa experimental, se determinó la consistencia y densidad de cada tipo de hormigón en estado fresco. Esta última se obtuvo una vez llenados los moldes de las probetas siguiendo las pautas de la norma UNE-EN: 12350-6. La consistencia se determinó inmediatamente después de cada amasada mediante la medida del asiento en cono de Abrams (UNE-EN: 12350-2).



Figura III-17. Medida de la consistencia mediante el cono de Abrams

## 4.3 Ensayos en estado endurecido

### 4.3.1 Propiedades físicas. Densidad y absorción

Sobre el hormigón endurecido se realizaron ensayos a 28 días para la obtención de la densidad y absorción de los diferentes hormigones de estudio, empleando para ello dos probetas cilíndricas de 10x20 cm (Figura III-18).



Siguiendo el procedimiento detallado en la norma EN-12390-7 se determinó, en ambas fases, la densidad según se recibe en el momento de desmoldeo y, en la Fase Vigas I, la absorción y los valores de la densidad tras secado en estufa y saturado superficie seca a 28 días.



Figura III-18. Probetas para el ensayo de densidad y absorción

### 4.3.2 Propiedades tenso-deformacionales. Resistencia a compresión, tracción, módulo y diagrama tensión-deformación

Los ensayos para determinar la resistencia a compresión se realizaron, de acuerdo a la norma UNE-EN 12390-3, sobre los tres tipos de probetas: cúbicas y cilíndricas de 15x30 cm y de 10x20 cm. Para la resistencia a tracción indirecta, los ensayos se realizaron sobre probeta cilíndrica de 15x30 cm según la norma UNE-EN 12390-6.

En la Fase Vigas se ensayaron a 28 días de edad las probetas y la viga bajo cargas incrementales. Se repitieron los ensayos a la edad de introducción de la carga sostenida, aunque sólo sobre las probetas cilíndricas de 15x30 cm (*Figura III-19*).



Figura III-19. Ensayos de caracterización de las probetas

En esta fase experimental de la Fase Vigas es imprescindible conocer el diagrama tensión-deformación y el valor del módulo de deformación de los diferentes hormigones de estudio, llevándose a cabo mediante el ensayo recogido por la norma UNE-EN: 83316. Para ello, se emplearon probetas cilíndricas de 15x30 cm, sobre las que se situaron cuatro galgas extensométricas, dos en vertical para medida de la deformación axial y dos en horizontal para medida de la deformación transversal (*Figura III-19*). A lo largo de todo el ensayo se midieron y registraron cargas y deformaciones, mediante un sistema de adquisición de datos compuesto por un PC con software de adquisición y tarjeta interfaz, escáner y tarjetas de sensores.

En la Fase Adherencia se realizaron únicamente ensayos de resistencia a compresión sobre probeta cúbica a varias edades (3, 7, 28, 90 y 365 días) a fin de determinar su evolución temporal.

Todas las probetas se ensayaron en una prensa MTS con un actuador de carga axial de 5 MN.



La *Tabla III-7* resume los tipos y edades de ensayo realizados para la caracterización de cada hormigón estudiado.

	Tipo de ensayo	Tipo de probeta	Edad
<b>Fase Vigas</b>	Compresión	3 cúbicas 10x10x10 cm 3 cilíndricas 15x30 cm 2 cilíndricas 10x20 cm	28 días
	Tracción indirecta	2 cilíndricas 15x30 cm	
	Módulo de deformación	2 cilíndricas 15x30cm	
	Densidad y absorción	2 cilíndricas 10x20 cm	
	Compresión	3 cilíndricas 15x30 cm	Día de puesta bajo carga sostenida (42 días)
	Tracción indirecta	2 cilíndricas 15x30 cm	
	Módulo de deformación	2 cilíndricas 15x30cm	
<b>Fase Adherencia</b>	Compresión	3 cúbicas 10x10x10 cm	3,7,28,90 y 365 días

Tabla III-7. Plan de ensayos para la caracterización del hormigón endurecido

#### 4.3.3 Propiedades reológicas. Retracción y fluencia

La medida de la retracción desarrollada por los diferentes hormigones de estudio es imprescindible para el posterior análisis de la fluencia bajo carga sostenida. Por ello se fabricaron dos probetas prismáticas de 60x15x15 cm para cada tipo de hormigón. Sobre ellas se midió la deformación en ausencia de solicitaciones bajo las mismas condiciones de humedad y temperatura que las probetas y vigas fabricadas para los ensayos bajo carga sostenida.

La medida de la retracción, desde el hormigonado hasta la finalización de los ensayos diferidos, se realizó mediante una galga embebida en el centro de la probeta y conectada a un sistema de adquisición de datos que registró de manera continuada las deformaciones producidas (*Figura III-20*).



Figura III-20. Ensayo de retracción. Probetas y galgas

Para el control de la fluencia se utilizaron dos probetas cilíndricas de 10x20 cm sometidas a carga sostenida axial durante 1000 días. Se trató de que la tensión aplicada sobre las probetas fuese la misma que la alcanzada en la fibra más comprimida de la cabeza de compresión de la viga fabricada para el ensayo estructural a flexión de la Fase Vigas II. Esta tensión se obtuvo mediante un sistema de carga que permitió el ensayo simultáneo de vigas y probetas, cuyo esquema se detalla en el siguiente apartado.

Las deformaciones se midieron mediante cuatro galgas de hormigón (dos longitudinales y dos transversales) colocadas en cada una de las dos probetas, y dos discos metálicos DEMEC que, alineados con cada galga, proporcionaron medidas manuales en previsión de que fallase

alguna de las galgas. La carga se midió con precisión mediante una célula de carga situada en la parte superior del bastidor que alojaba ambas probetas (*Figura III-21*).



Figura III-21. Ensayo de fluencia. Probetas y galgas

## 5 ENSAYOS ESTRUCTURALES A FLEXIÓN

El desarrollo de los ensayos estructurales a flexión constituye la Fase Vigas de esta campaña experimental. En ella se determinó, frente a tal esfuerzo, la respuesta estructural de las vigas de hormigón reciclado sometidas a cargas incrementales a 28 días (Fase Vigas I) y bajo carga sostenida (Fase Vigas II). En esta última, los ensayos se diseñaron para introducir una carga constante a 42 días ( $t_0$ ) que se mantuvo durante 1000 días ( $t-t_0$ ).

Para el desarrollo de ambas fases se fabricaron dos vigas gemelas por cada uno de los tipos de hormigón de estudio. Se ensayaron, por tanto, dieciséis vigas.

### 5.1 Geometría y armado de las vigas

Para la definición de la geometría de la viga a ensayar se optó por considerar una dimensión habitual de vigas de edificación que forman parte de pórticos planos. Así, la viga prototipo considerada tiene una longitud de 5 m y una sección  $h \times b$  de 450 x 300 mm. Para el ensayo en laboratorio se definió, a partir del prototipo, un modelo reducido a escala 2/3, lo que supuso unas dimensiones ( $l \times b \times h$ ) de 3400 x 300 x 200 mm.

Las vigas han sido calculadas considerando las cargas, permanente y variables, y sus combinaciones establecidas en el CTE. Como cargas permanentes se considera el peso propio de la viga, obtenido a partir de sus dimensiones y de la densidad del hormigón, y el peso propio de los elementos constructivos (tabiquería, forjado y pavimento). Como acción variable se adopta la sobrecarga de uso A1, definida en el CTE para viviendas, lo que supone una carga uniforme de 2 kN/m<sup>2</sup>. Asimismo, se fija en 4 metros el área de incidencia del forjado sobre la viga.

Definidas las cargas sobre la viga prototipo, se deducen las del modelo reducido a escala. De este modo, se obtiene la carga total con que realizar los cálculos, plasmada en los valores recogidos en la *Tabla III-8*.

Los recubrimientos se establecen de acuerdo a las recomendaciones de la Instrucción Española del Hormigón estructural [EHE-08], considerando un control de ejecución intenso, una vida útil de 50 años, el empleo de cemento CEM-I 52.5 N/SR, y la resistencia a compresión, relación agua/cemento, tipo de ambiente y dimensiones que se resumen en la *Tabla III-9* para cada serie de vigas a ensayar.

Tipo de carga		Carga Real	Carga modelo reducido
Peso propio viga		3.38 kN/m	2.25 kN/m
Carga permanente (peso propio de los elementos constructivos)	Tabiquería	3.33 kN/m <sup>2</sup>	3.33 kN/m <sup>2</sup>
	Forjado	3.00 kN/m <sup>2</sup>	
	Pavimento de madera	1.00 kN/m <sup>2</sup>	
Sobrecarga de uso		2.00 kN/m <sup>2</sup>	1.33 kN/m <sup>2</sup>
Incidencia		4.00 m	4.00 m
<b>Carga total</b>		<b>31.38 kN/m</b>	<b>20.92 kN/m</b>

Tabla III-8. Cargas consideradas en el dimensionamiento de la viga

	a/c	f <sub>c</sub> mínima (MPa)	Ambiente	Recubrimiento prototipo/modelo (mm)	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	d (mm)	d <sub>1</sub> / d <sub>2</sub> (mm)
<b>H50</b>	0.50	40	IIIa	50 / 35	380	249	51 / 41
<b>H65</b>	0.65	30	I	30 / 20	275	266	34 / 30

Tabla III-9. Parámetros de diseño y geometría de las vigas

Para el diseño del armado de acuerdo al método de los Estados Límite se emplearon para las cargas los coeficientes de seguridad 1.35 (permanentes) y 1.50 (sobrecarga). Las armaduras obtenidas para ambas series de vigas se detallan en la *Figura III-22* y en la *Figura III-23*.

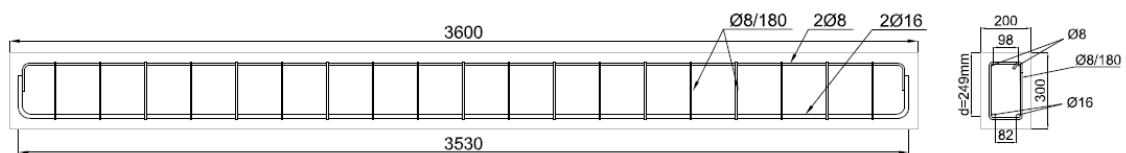


Figura III-22. Armadura de las vigas de la serie H50

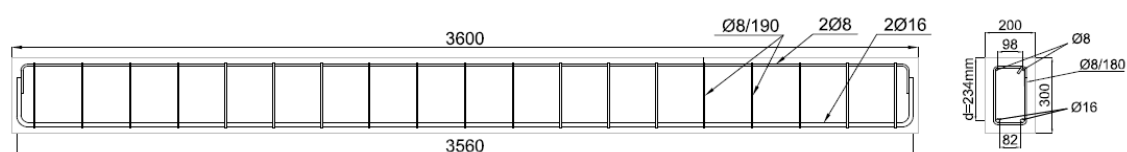


Figura III-23. Armadura de las vigas de la serie H65



Figura III-24. Armadura de las vigas

## 5.2 Fabricación y curado

Para la fabricación de las vigas fue necesario realizar el montaje previo del encofrado (de la empresa PERI), colocando en el interior la armadura con los separadores que garantizaron el recubrimiento exigido en las series H65 y H50 (*Figura III-25*).

En la Fase Vigas se realizaron, para cada tipo de hormigón, 6 amasadas (tres de 90 litros y tres de 110 litros) con las que se fabricaron las dos vigas gemelas y sus correspondientes probetas de caracterización.

Para la ejecución de las vigas se llenó el encofrado mediante vertido directo del hormigón en tres tongadas. Cada una de ellas se compactó con vibrador de aguja cosiendo la tongada inferior hasta alcanzar un material homogéneo y sin juntas. El hormigón se enrasó cuidadosamente para ajustar la geometría de las vigas a la prevista (*Figura III-26*). El curado se realizó mediante una arpillera húmeda colocada sobre la superficie de las mismas, tratándose de igual modo las probetas de caracterización. Transcurridas 24 horas, se retiró la arpillera y se procedió al desmoldado. Todas las vigas se almacenaron en el laboratorio a temperatura y humedad ambiente hasta la fecha de ensayo o puesta en carga (*Figura III-27*).



Figura III-25. Montaje del encofrado de las vigas y colocación de la armadura



Figura III-26. Fabricación de las vigas: vertido, compactación y enrase del hormigón



Figura III-27. Vigas almacenadas en laboratorio hasta ensayo



### 5.3 Instrumentación

Con el fin de conocer detalladamente la respuesta del hormigón y el acero durante el desarrollo de los ensayos se utilizó la siguiente instrumentación:

- **Galgas extensométricas para la armadura.** De la marca MM y tipos EA-125BT-120 (unidireccionales de longitud 11 mm), se alimentaron a 2.5 voltios para medir deformaciones en la armadura. Estas galgas se adhirieron a las barras de armado de las vigas, tanto a las longitudinales (de compresión y de tracción), como a las transversales de cortante. La colocación de la instrumentación sobre la armadura fue previa al hormigonado quedando, tras este, las galgas embebidas en el hormigón, por lo que fue necesario recubrirlas antes con materiales aislantes y protectores siguiendo un procedimiento específico (M-coat B y butilo, de la MM).
- **Galgas extensométricas de hormigón.** De la marca TML y tipo PL-60-11 (unidireccionales de longitud 60 mm), midieron las deformaciones del hormigón alimentadas con el mismo voltaje. Este tipo de galgas se adhirieron al hormigón con adhesivo PS de la marca TML sobre una superficie acondicionada previamente.
- **Discos metálicos DEMEC.** Se adhirieron sobre el hormigón a ambos lados de cada galga de hormigón, proporcionando medidas manuales de la deformación gracias a un extensómetro mecánico de la marca Wykeham Farance Slough y precisión de 2 micras. En ensayos de larga duración conviene duplicar la instrumentación deformacional, especialmente en las superficies del hormigón sobre las que las galgas quedan más expuestas y pueden perderse. Los discos, con este fin colocados, permiten contrastar además las medidas de las galgas.
- **Transductores de desplazamiento.** Modelo HS100 de la marca Vishay, precisión 0.001 mm y alimentados a 10 voltios. Se situaron en el centro de luz con para medir la flecha desarrollada por la viga. En los ensayos bajo cargas incrementales se dispusieron, además, transductores de desplazamiento en los vanos de cortante.
- **Células de carga.** De la marca Vishay, modelo RLC que permiten conocer la carga aplicada sobre las vigas durante el ensayo.
- **Sistema de adquisición de datos.** Al igual que en los ensayos sobre probetas, está compuesto por un PC con software de adquisición y tarjeta interfaz, escáner y tarjetas de sensores, de la marca Vishay.

La armadura se instrumentó con 16 galgas de acero por viga, para obtener información del comportamiento de la misma durante el transcurso del ensayo. Para ello fue necesario realizar un replanteo detallado de la posición de cada una de las galgas. Tras el pegado de las galgas, se ejecutó una cuidadosa impermeabilización de las mismas para asegurar su correcto funcionamiento e impedir su deterioro una vez hormigonada la viga (*Figura III-28*).

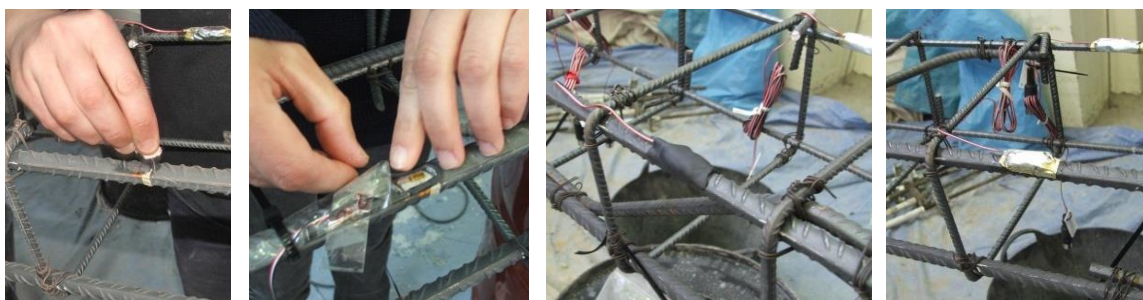


Figura III-28. Colocación y protección de las galgas adheridas a las armaduras

## 5.4 Procedimiento de ensayo bajo cargas incrementales

La Fase Vigas I trata de definir el comportamiento a flexión de los hormigones reciclados bajo cargas incrementales, por lo que se ensayan hasta rotura ocho vigas, cuatro de cada serie (H50-0, H50-20, H50-50, H50-100 y H65-0, H65-20, H65-50, H65-100).

### 5.4.1 Geometría del ensayo y situación de la instrumentación

En el ensayo se aplican sobre la viga dos cargas puntuales centradas (separadas 850 mm) mediante una viga de reparto, que a su vez es cargada en su centro mediante un actuador vertical (*Figura III-29 y Figura III-30*).

Las leyes de esfuerzo evolucionan con la carga, aunque siempre son proporcionales a las que se muestran en la *Figura III-31*. De esta forma, se obtiene una zona central de flexión cuasiconstante que será objeto de estudio (actúa, además, el peso propio, cuyo efecto relativo decrece al aumentar la carga).

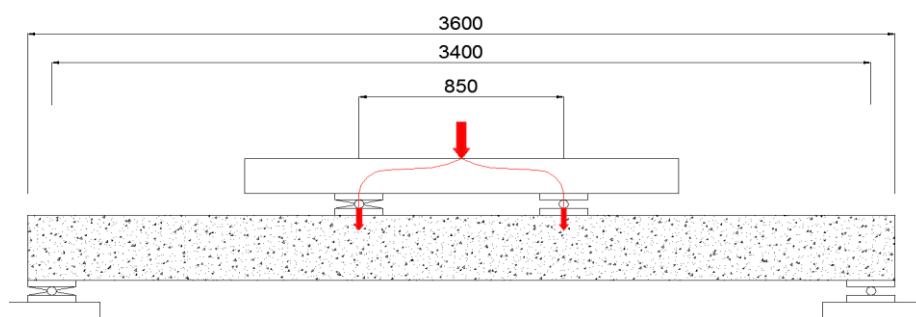


Figura III-29. Geometría de ensayo a flexión bajo cargas incrementales (mm)



Figura III-30. Ensayo bajo cargas incrementales

La disposición de las galgas de acero en las armaduras se presenta en la *Figura III-32* y en la *Figura III-33*. La nomenclatura asignada a las galgas de la armadura longitudinal detalla la posición de las mismas, refiriéndose la primera letra a su ubicación en la sección (superior = S; inferior = I), la segunda a la cara de la viga en la que se sitúa (W = Oeste; E = Este) y el número a la coordenada longitudinal en la que se dispone, medida desde el extremo de la armadura en cm. Así, la galga SW178 está colocada en la cara Oeste de la viga en su parte superior y en la sección central, ya que se encuentra a 178 cm del extremo de la armadura.

Las galgas colocadas en los estribos se nombran con una E, seguida de su orientación (W o E) y un número (1= inicio, Norte ó 2= final, Sur) asignado a cada extremo de la viga.

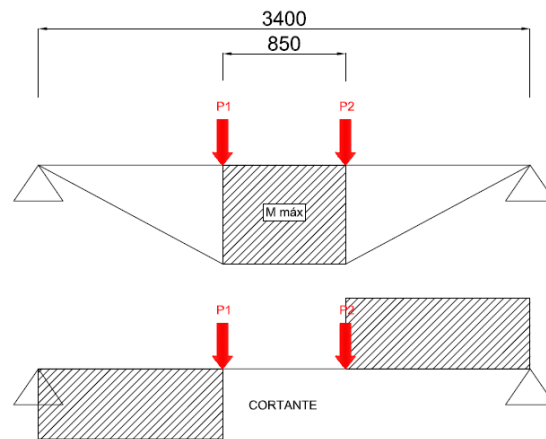


Figura III-31. Leyes de esfuerzo en ensayo a flexión (sin considerar el peso propio)

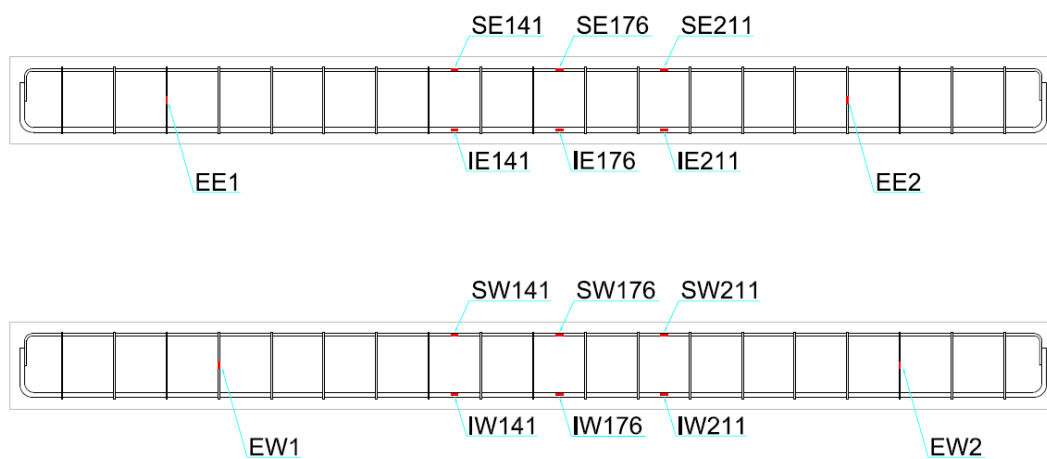


Figura III-32. Disposición de las galgas en la armadura para las vigas H50 (*lado Este en la imagen superior y Oeste en la inferior*). Fase Vigas I

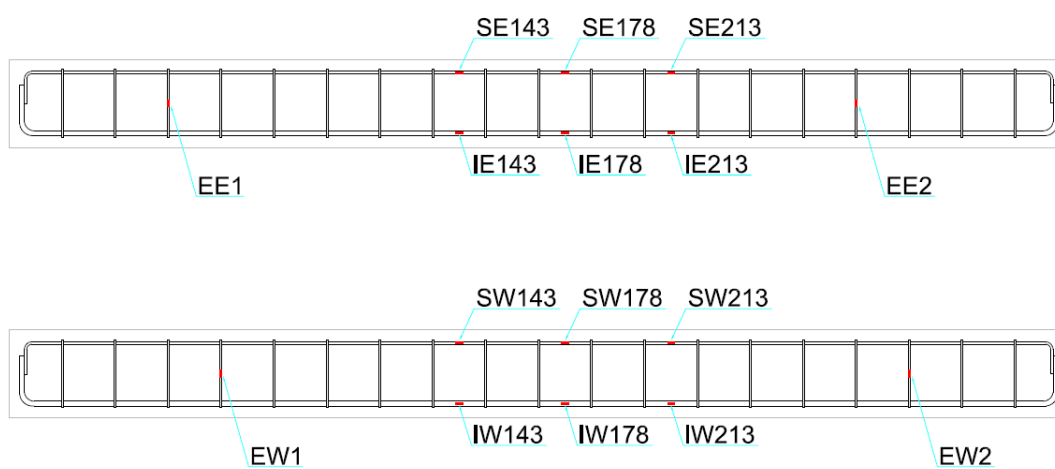


Figura III-33. Disposición de las galgas en la armadura para las vigas H65 (*lado Este en la imagen superior y Oeste en la inferior*). Fase Vigas I

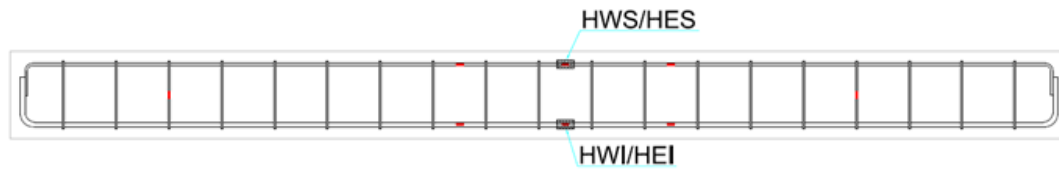


Figura III-34. Disposición de las galgas de hormigón en la sección central de la viga. Fase Vigas I

Por otra parte, se colocaron galgas de hormigón en la sección central (coincidiendo con las centrales de la armadura longitudinal), dos en la cara Este (HES y HEI) y dos en la Oeste (HWS y HWI) según refleja la *Figura III-34*.

La designación de las galgas consta de tres letras. La H inicial informa de que se trata de una galga de hormigón, la segunda letra, E o W, aporta información sobre la orientación de las mismas (Este u Oeste), y la última indica si está colocada a la profundidad de la armadura longitudinal superior (S) o inferior (I).

Para medir las flechas durante desarrollo del ensayo se colocaron, además, tres transductores de desplazamiento en cada viga. El de centro de luz, conectado directamente al sistema de carga de la viga, se empleó como parámetro del control del ensayo, y los otros dos, a ambos lados de éste, se dispusieron a 750 mm de cada extremo de la viga con el objetivo de completar y comprobar los datos obtenidos por el central (*Figura III-35 y Figura III-36*).

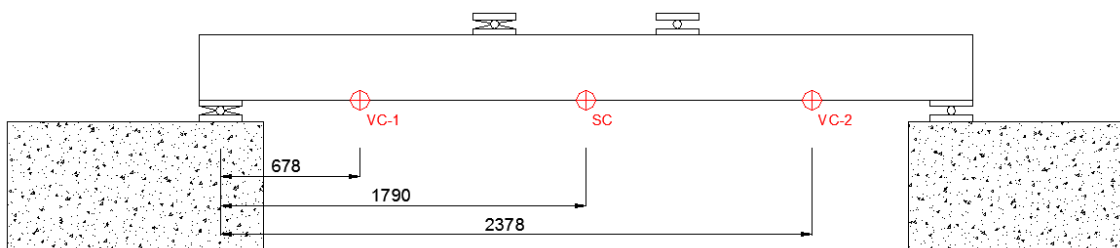


Figura III-35. Disposición de transductores de desplazamiento (cotas en mm). Fase Vigas I



Figura III-36. Transductores de desplazamiento durante los ensayos. Fase Vigas I

#### 5.4.2 Desarrollo del ensayo

Todas las vigas se ensayaron bajo control por flecha en un pórtico diseñado por el grupo gCons, en el que la carga se aplica mediante un actuador vertical MTS 243, de hasta 2.7 MN de carga y 1 m de carrera. A través del software TestStarII de MTS, el ensayo se gobierna imponiendo que la flecha del transductor central varíe a razón de 1.5 mm por minuto, lo que exige que el actuador desarrolle la carga necesaria para ello en cada momento. Este control,



muy adecuado para captar el comportamiento de la viga en la etapa de prerrotura, comienza desde el momento en que el actuador contacta con la viga de reparto, y se mantiene hasta que se alcanza una flecha aproximada de 100 mm en el vano central de la viga ensayada.

La secuencia de ensayo (*Figura III-37*) consiste en incrementar la flecha durante dos minutos aproximadamente, y mantenerla durante un minuto para marcar las fisuras que se generan en la viga [SERR94]. Durante la pausa o descanso, obviamente, se reduce un poco la carga.

Para facilitar el marcado y posterior desarrollo del mapa de fisuras, se dibuja una cuadrícula sobre fondo blanco en una de las caras de la viga. Durante los periodos de descanso del ensayo, se señalan las fisuras mediante un código de colores (*Figura III-38*).

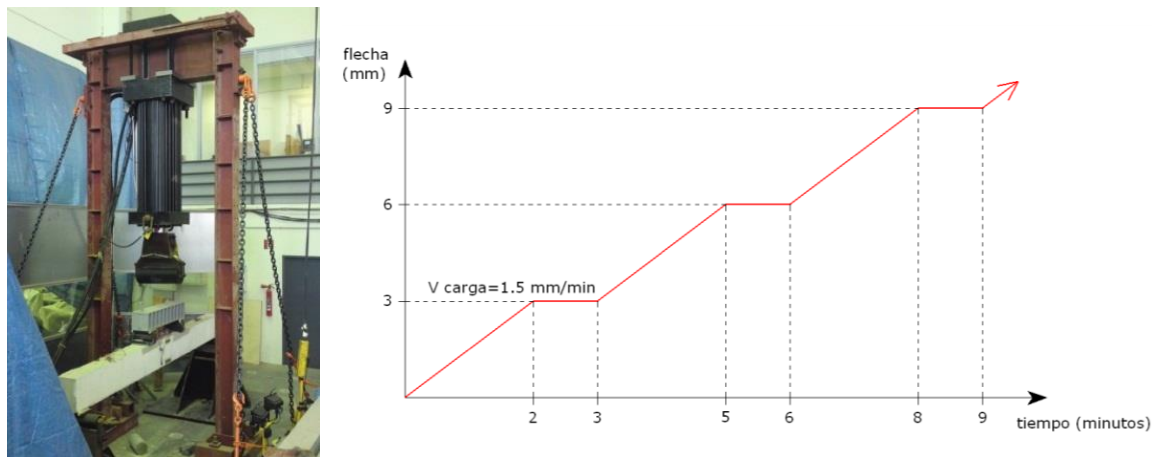


Figura III-37. Esquema de ensayo bajo cargas incrementales

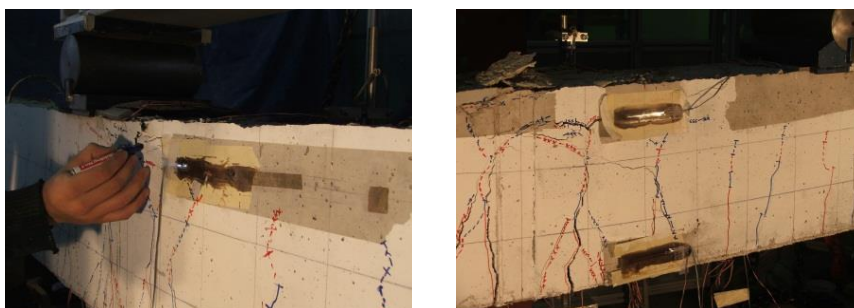


Figura III-38. Marcado de fisuras durante el ensayo bajo cargas incrementales

## 5.5 Procedimiento de ensayo bajo cargas sostenidas

En la Fase Vigas II se realiza el estudio a flexión de ocho vigas bajo carga sostenida, cuatro de cada serie (H50-0, H50-20, H50-50, H50-100 y H65-0, H65-20, H65-50, H65-100). Se lleva a cabo el ensayo mediante un sistema capaz de mantener la carga por gravedad durante tiempo ilimitado. El valor de la carga se define imponiendo que la cabeza comprimida de la sección de centro de luz no rebase la tensión del 40% de la resistencia a compresión del hormigón ( $f_c$ ) en el instante de carga. De esta forma la viga trabaja en condiciones de servicio habituales, y la fluencia se desarrolla en el rango de la fluencia lineal. Con estas premisas se ensayaron las vigas durante 1000 días.

### 5.5.1 Geometría del ensayo y situación de la instrumentación

La carga se aplica mediante un sistema elemental de palanca, apoyando sobre la viga un bastidor metálico del que se cuelga un peso muerto en uno de sus extremos, anclado el otro a la losa de carga del laboratorio a través de un tirante traccionado.

El tirante de reacción del bastidor a la losa de carga no se ancla a ésta directamente, sino que se aprovecha su fuerza para generar una carga de compresión sobre dos probetas dispuestas en el núcleo de un bastidor, ubicado bajo la losa de carga y apoyado contra ella. Estas probetas (cilíndricas de 10x20 cm), fabricadas con el mismo hormigón que la viga, desarrollan deformaciones de fluencia producida por dicha carga compresiva, que introduce tensiones similares a las alcanzadas en la cabeza de compresión de la viga en la sección central, nunca superiores, como se ha dicho, al 40% de la resistencia a compresión del hormigón. Para ello, el bastidor inferior requiere de una multiplicación de la carga, conseguida por un juego de poleas. El conocimiento preciso de la carga sobre las probetas se alcanza colocando sendas células de carga, una en el tirante a tracción y la otra en serie con las probetas, en su mismo eje axial y en el núcleo del bastidor inferior. El bastidor y el sistema de carga por poleas se han diseñado según los planos de la *Figura III-39*.

La simultaneidad de los ensayos requería de una planificación rigurosa para la ubicación en el laboratorio de las diferentes vigas fabricadas y sus correspondientes bastidores de carga, dadas las dimensiones y duración de los ensayos. Se trató, por tanto, de minimizar en la medida de lo posible el impacto de estos ensayos en el desarrollo de los trabajos y actividades simultáneos en el Laboratorio de Construcción del CITEEC, con la dificultad añadida de la convivencia de ensayos a dos niveles (sobre y bajo la losa de carga, respectivamente, los ensayos de las vigas y de las probetas). Finalmente, se concretó la distribución en planta presentada en la *Figura III-40* y en la *Figura III-41*. Como puede observarse, la carga de las vigas (y consecuentemente de las probetas) se consiguió mediante un big-bag de árido de entre 700 y 1000 kg, colgado del bastidor a través de un cable que hacía posible situar la carga bajo la losa, en una situación menos molesta. La palanca del bastidor superior multiplicaba la carga por 2 ó 3 veces el peso del big-bag, aplicándose con tal valor a las vigas, y las poleas del piso inferior llegaban a cuadruplicar la carga superior, todo ello sin mediación de ningún dispositivo hidráulico o eléctrico.

En la Fase Vigas II, además de las galgas definidas para la Fase Vigas I, se utilizaron dos galgas de hormigón adicionales en la cabeza de compresión, fibra más comprimida de la sección central, y dos discos metálicos DEMEC por cada galga de hormigón. Estos discos se colocaron de manera alineada a cada una de las galgas, tanto para las situadas en la cabeza de compresión como en los laterales de la viga (*Figura III-42*). Por último, se dispuso un único transductor de desplazamiento para el registro de la flecha en la sección central de la viga y dos células de carga para controlar el ensayo (*Figura III-43*).

La *Figura III-44* refleja un esquema general de la situación de la instrumentación en las vigas y probetas de fluencia durante el proceso de ensayo de la Fase Vigas II.

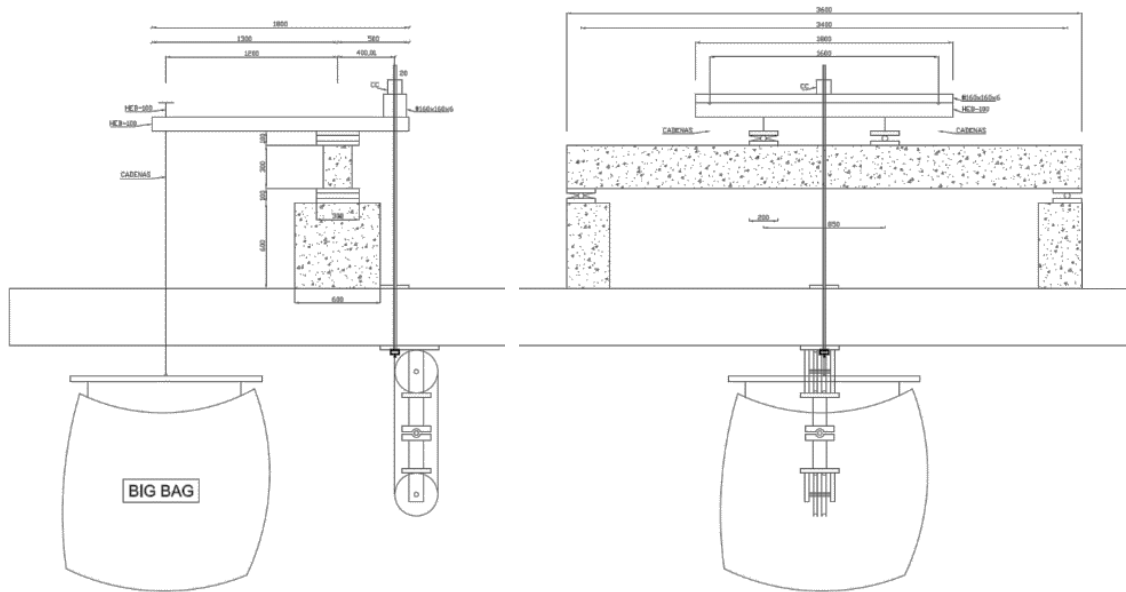


Figura III-39. Esquema del ensayo bajo carga sostenida y probetas de fluencia dentro del bastidor.Fase Vigas II

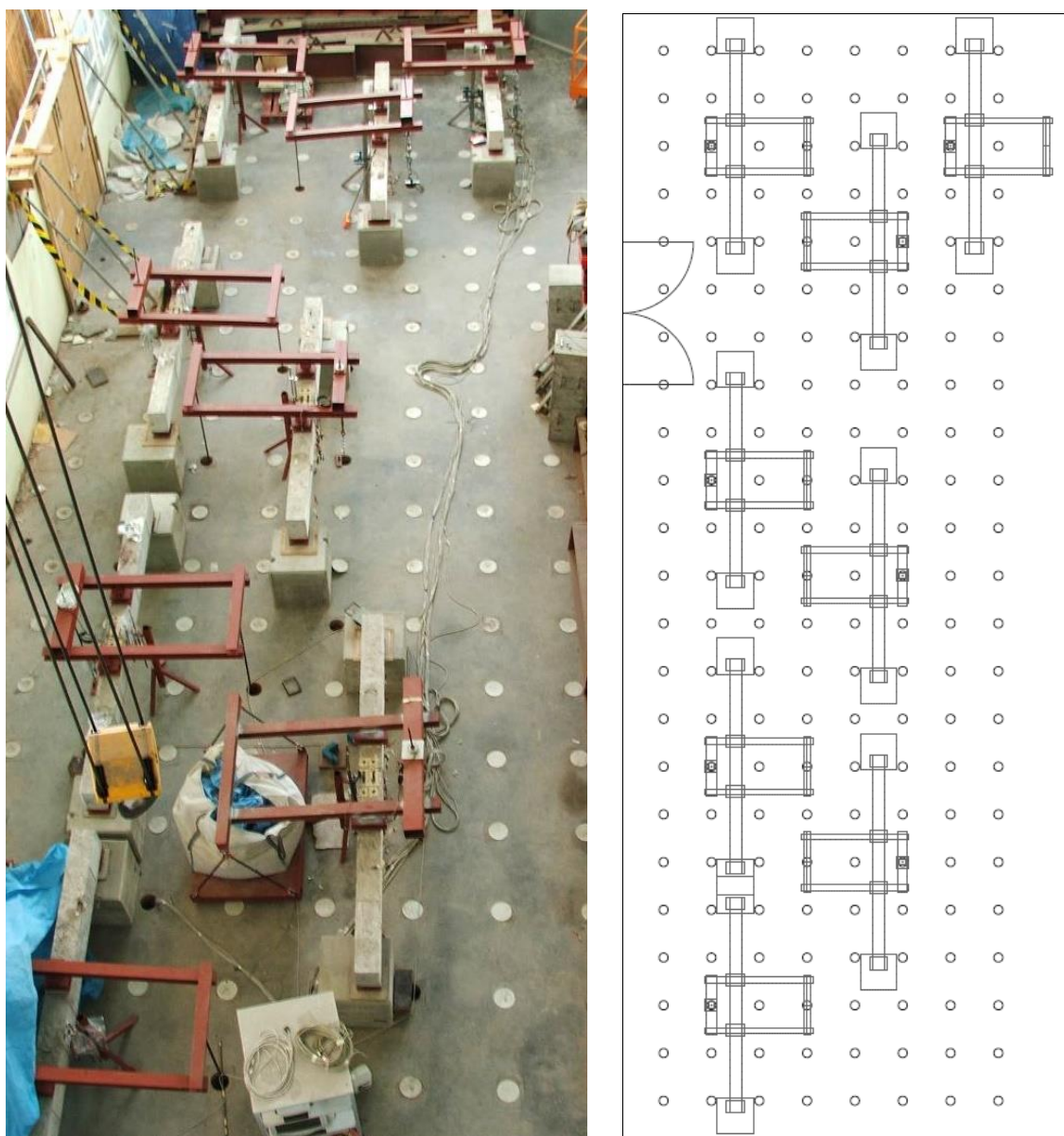


Figura III-40. Distribución en planta del sistema de ensayo bajo carga sostenida. Fase Vistas II



Figura III-41. Sistema de carga en el ensayo bajo carga sostenida. Fase Vistas II



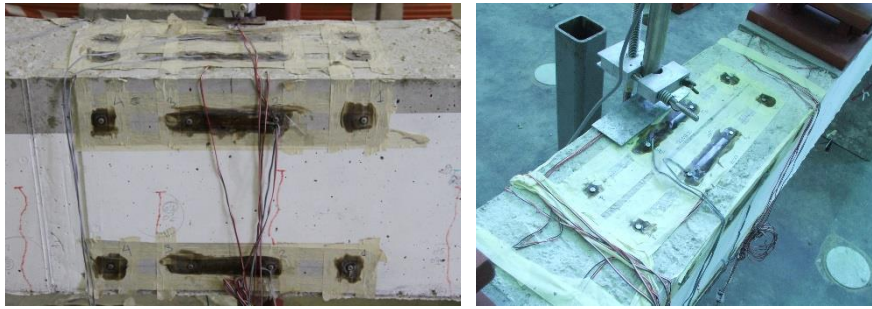


Figura III-42. Galgas de hormigón y discos metálicos en el hormigón. Fase Vigas II



Figura III-43. Transductor de desplazamiento y célula de carga. Fase Vigas II



Figura III-44. Esquema general de la instrumentación. Fase Vigas II

### 5.5.2 Desarrollo del ensayo

El proceso de carga se estructuró con el objetivo de alcanzar una tensión del 30% de  $f_c$  en la fibra más comprimida de la sección central de la viga (rango elástico). Por este motivo se ubican galgas extensométricas en la fibra superior de la sección central de la viga, que además de fijar el nivel de carga inicial aportan las lecturas sucesivas a largo plazo.

Una vez fijado el nivel tensional que se pretende aplicar,  $\sigma = 0.3 f_c$ , el día de puesta en carga ( $t_0 = 42$  días) se ensayan probetas para determinar el módulo de deformación longitudinal y la

resistencia a compresión del hormigón. Con ambos datos se establece la deformación que debe alcanzarse en la fibra superior de la cabeza de compresión, empleada así para el control de la carga. Se coloca entonces el big-bag con una carga estimada mediante las leyes de la palanca y se mide la deformación instantánea alcanzada que, en general, no coincide con la estimada originalmente. Las desviaciones respecto al objetivo tienen su origen, por un lado, en las pérdidas por rozamiento que desarrolló el sistema de poleas para cargar las probetas a fluencia (un único cable vinculaba el sistema de palanca con el bastidor de fluencia pasando por las poleas) y, por otro, a las tolerancias que el sistema de palanca presentaba. En ningún caso, como estaba previsto, la carga superó la tensión del 45% de  $f_c$ .

Así, con los valores reales de la deformación instantánea alcanzada y el valor del módulo de elasticidad obtenido, se determina el estado tensional real correspondiente al instante de carga  $t_0$ . Dichas tensiones se corroboraron mediante las células de carga dispuestas sobre el pórtico de palanca, a las que se ancló el cable de transmisión de carga al bastidor de fluencia.

## 6 ENSAYOS DE ADHERENCIA

En esta fase experimental se pretende conocer la influencia del árido reciclado en la capacidad adherente del hormigón y su relación con la resistencia mecánica del mismo. Para ello, se realiza por una parte, la caracterización básica de los hormigones y, por otra, se acometen los ensayos de adherencia propiamente dichos.

La evaluación de la adherencia se abordó mediante ensayos de arrancamiento, tipo pull-out, dadas la facilidad de ejecución y simplicidad de los mismos. Para su desarrollo se siguieron las recomendaciones de la RILEM, “*Bond test for reinforcement Steel*” [RC6-83], según las cuales los ensayos se realizan sobre probetas cúbicas sin confinamiento, en las que se embebe una barra de acero corrugado B500SD cuyo diámetro define las medidas de la probeta de ensayo.

### 6.1 Fabricación y curado

En la Fase Adherencia se realizaron amasadas de 162 litros por cada tipo de hormigón de estudio. Para la ejecución de las probetas se siguieron las mismas pautas que en la Fase Vigas, realizándose el vertido directo del hormigón en los moldes, compactado por vibración y enrasado una vez llenados los moldes (Figura III-45).

De nuevo se realizó el curado mediante una capa de arpillera húmeda sobre las probetas, teniendo lugar el desmoldeo a las 24 horas de la fabricación. Todas las probetas, tanto de caracterización como de adherencia, se almacenaron en cámara climática hasta el día de ensayo, bajo condiciones ambientales normalizadas de 20°C de temperatura y 95% de humedad (UNE-EN 12390-2). Durante este tiempo, las barras embebidas se mantuvieron en posición horizontal para evitar cualquier tipo de tensión en el hormigón que pudiera interferir en su capacidad adherente.



Figura III-45. Fabricación y curado de probetas para ensayo pull-out. Fase Adherencia

## 6.2 Instrumentación

Para el desarrollo de los ensayos se empleó un sistema de carga formado por un gato hidráulico, un dispositivo de anclaje de la probeta, una célula de carga y transductores de desplazamiento. Estos últimos son los encargados de controlar el ensayo y registrar de manera continua los valores de la carga actuante y el deslizamiento de la barra.

La instrumentación utilizada durante el desarrollo de los ensayos de adherencia se describe a continuación:

- **Sistema de adquisición de datos.** El sistema está compuesto por un PC con software Vishay de adquisición y tarjeta interfaz, escáner para las tarjetas de sensores y tarjetas de sensores.
- **Equipo oleo-hidráulico:** Sistema SERVOSIS compuesto por un PC con software de control, un grupo de bombeo, un gato hidráulico LARZEP encargado de aplicar la carga y un soporte sobre el que colocar las probetas para su ensayo.
- **Transductores de desplazamiento:** De la marca APEK, con precisión de 0.01 mm, alimentados a 10 voltios, uno con recorrido máximo de 11 mm para medir el deslizamiento de la barra en su extremo libre, y otro de 51.3 mm para el control del ensayo desde el extremo cargado.
- **Célula de carga hueca:** De la marca SENSOTEC, con capacidad de 330 kN y alimentada con una diferencia de potencial de 10 voltios.

## 6.3 Procedimiento de ensayo

### 6.3.1 Geometría del ensayo y situación de la instrumentación

Existe un amplio número de factores que, dependiendo de la disposición o esquema de ensayo que se adopte, influirán en mayor o menor medida en la respuesta adherente del hormigón. En este caso, como se ha dicho, se opta por realizar un ensayo de arrancamiento tipo *pull-out* [RC6-83] sobre probetas cúbicas sin confinamiento. La elección de este tipo de ensayo se debe a la disponibilidad de medios físicos para su realización, la sencillez de ejecución frente a la información que proporciona y la amplia aceptación internacional. Al estar recomendado por la RILEM como ensayo para el análisis de la adherencia entre el hormigón y las armaduras pasivas, permite establecer comparaciones o contrastar resultados con otras investigaciones de este tipo, realizadas por diferentes autores.

Una vez definido el tipo de ensayo se determinan sus principales parámetros, algunos relacionados, entre los que se encuentran el diámetro de la barra, el tamaño de la probeta, la longitud de adherencia, el recubrimiento, las condiciones adherentes determinadas por la dirección de hormigonado o el nivel de corrosión de las armaduras.

El lado  $\lambda$  de la probeta depende del diámetro  $\phi$  de la barra según la relación  $\lambda = 10 \cdot \phi$ . Fijado el diámetro de la barra en 10 mm la probeta cúbica tendrá unas dimensiones de 10x10x10 cm, lo que establece de modo directo el recubrimiento. La zona con adherencia, más cercana al extremo no cargado de la barra, tiene una longitud de  $5 \cdot \phi$ , evitándose el contacto en la otra zona con la disposición de una cinta adhesiva sobre la barra previa al hormigonado. Se realiza, además, un análisis en el tiempo de la adherencia mediante ensayos a 7, 28, 90 y 365 días. Los ensayos Pull-out a 3 días, fueron descartados por las bajas tensiones adherentes desarrolladas a esa edad, especialmente en los hormigones reciclados.

El esquema de ensayo se detalla en la *Figura III-46*, donde puede observarse cómo uno de los dos transductores utilizado se situó en el extremo superior libre con el fin de determinar el deslizamiento experimentado por las barras de acero durante el ensayo. El segundo se conecta

directamente al equipo de ensayo y su función principal es controlar la velocidad de aplicación de la carga de tracción sobre la barra. La célula de carga hueca se coloca tras el anclaje inferior de la barra, bajo el gato hidráulico, y se comprime a una carga igual que la de tracción con que la barra moviliza las tensiones de adherencia en la probeta. El sistema de anclaje de la barra, pasante a través del cilindro hidráulico, lo componen las cuñas y el cono correspondientes.

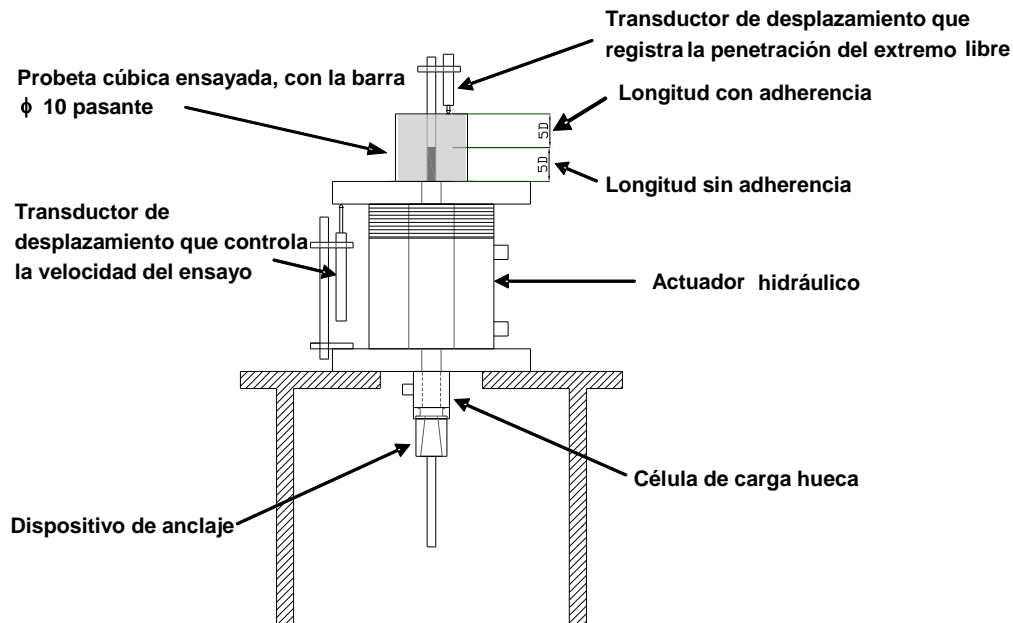


Figura III-46. Geometría de ensayo pull-out para probetas de 10x10x10 cm y barra  $\phi 10$  mm

Se decide colocar la armadura pasiva centrada y alineada a lo largo del eje del molde de la probeta. Con esta disposición se elimina la influencia del recubrimiento, definido como una de las variables con mayor incidencia en el comportamiento adherente del hormigón [MOLI04; DEHN00; BUTL11; YALC12]. Este esquema de ensayo, por otra parte, posibilita la obtención de unas buenas condiciones adherentes, al realizarse el vertido del hormigón en dirección perpendicular a la barra embebida y centrada en la probeta, y no presentará, por tanto, dificultades en la adhesión del hormigón a la barra durante el hormigonado.

De esta manera se centra el estudio en conocer la influencia del árido reciclado en la capacidad adherente del hormigón, principal objetivo de esta campaña experimental. Para ello, se varían los parámetros que a éste atañen, es decir, la capacidad resistente a compresión (en función de la relación agua/cemento, a/c) y el porcentaje de árido grueso natural sustituido por árido reciclado, eliminando del análisis otros factores como el recubrimiento.

### 6.3.2 Desarrollo del ensayo

El procedimiento de ensayo consiste en aplicar una carga de tracción en el extremo inferior de la barra mediante el actuador hidráulico que atraviesa y al que está anclada, garantizando un desplazamiento (por segundo) del pistón igual a 0.001 veces el diámetro de la barra [VOS82], que en este caso resulta de 0.01 mm/s al ser el diámetro de 10 mm. La velocidad de carga es un parámetro fundamental en este tipo de ensayos [VOS82], y se controla mediante el transductor de desplazamiento (el inferior, de mayor carrera) acoplado al actuador hidráulico.

A lo largo del ensayo se registran de manera continua los valores de la carga actuante y el deslizamiento de la barra. Para ello, se utiliza la célula de carga hueca situada en el anclaje



inferior y el transductor de desplazamiento del extremo superior libre de la barra. El dispositivo de ensayo se muestra gráficamente en la *Figura III-47*.

Diferentes autores y normativas [MC-10; ALME08] establecen tres puntos de la curva carga-deslizamiento del ensayo pull-out como valores fundamentales para el posterior cálculo de la tensión adherente media. Estas son las correspondientes a los deslizamientos de la barra en el extremo libre de 0.01, 0.1 y 1 mm. Por otra parte, el Código Modelo establece 1 mm como el valor del deslizamiento en el que se produce la estabilización de la carga y por tanto, su valor máximo.

Con el fin de definir completamente el proceso de ensayo y controlar su duración, se establece un deslizamiento máximo en el extremo libre de la barra que permita dar por finalizado el ensayo en caso de no haberse producido previamente un fallo por splitting de la probeta. Este límite garantiza a su vez la obtención de las medidas requeridas para el cálculo de la tensión de adherencia, tanto media como máxima. Teniendo en cuenta lo detallado anteriormente, se fija este límite en 1.5 mm.

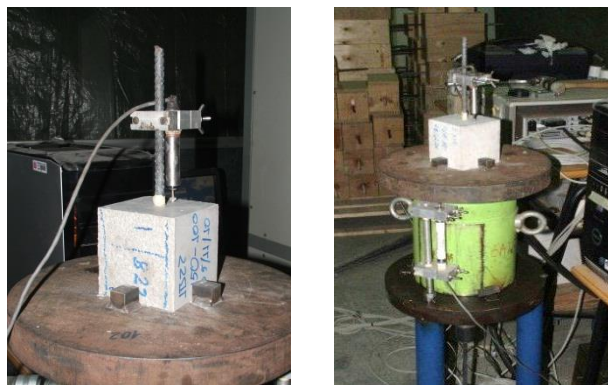
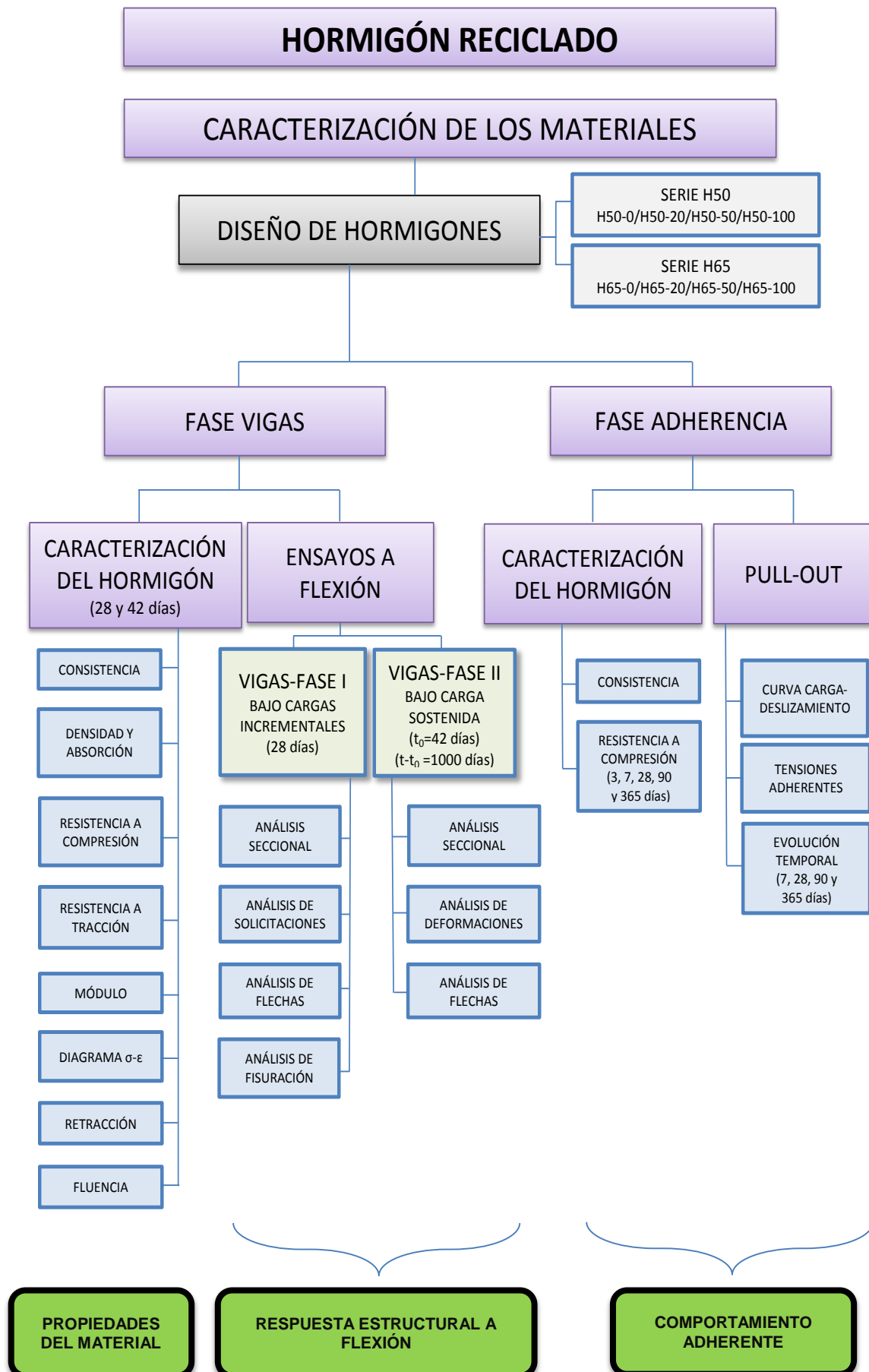


Figura III-47. Sistema de ensayo pull out

Se realizan un total de cinco especímenes por ensayo con el objetivo de minimizar en lo posible la dispersión de resultados. Se fabrican 20 probetas cúbicas de 10x10x10 cm con barra centrada de 10 mm de diámetro para cada tipo de hormigón a estudiar, que serán ensayadas a 7, 28, 90 y 365 días. De esta forma, se obtiene la curva de evolución temporal de la tensión de adherencia para los diferentes hormigones de estudio.

Finalmente, se presenta un diagrama resumen de la campaña experimental desarrollada para el estudio de la respuesta estructural a flexión y el comportamiento adherente de los hormigones reciclados.



---

# IV. CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN

---

## 1 INTRODUCCIÓN

La caracterización de los hormigones se desarrolló siguiendo el plan de ensayos recogido en el *Capítulo III*. Durante la Fase Adherencia se realizaron ensayos, únicamente, de medida de la consistencia y de la resistencia a compresión, necesarios para el estudio del comportamiento adherente. Durante la Fase Vigas la caracterización de los hormigones comprendió el análisis de la mayoría de sus propiedades en estado fresco y endurecido. En primer lugar se determinaron la consistencia y densidad del hormigón en estado fresco, y posteriormente se realizó la caracterización en estado endurecido: densidad, absorción, resistencias mecánicas (compresión y tracción), módulo de deformación, diagrama tensión - deformación, retracción y fluencia. Las probetas se mantuvieron en el ambiente del laboratorio, bajo las mismas condiciones termo-higrométricas que las vigas, incluso las destinadas a estudiar la evolución temporal de las deformaciones por retracción y fluencia hasta 1000 días ya que los resultados se emplearon en el análisis estructural de las mismas.

Ya que la caracterización durante la Fase Adherencia fue parcial, en este capítulo se recoge el resultado de caracterización correspondiente a la Fase Vigas.

El objetivo de la caracterización de los hormigones es evaluar la bondad de las expresiones normativas en la predicción de sus propiedades (resistencia a tracción, módulo de deformación, deformación de pico y última, retracción y fluencia) cuando se utilizan áridos reciclados. Del número de ensayos realizados, aun siendo notable, no podrá derivarse una formulación “exacta” de las mismas, al no haberse estudiado el efecto de otras variables que las modifican. Por ello, en este documento se aceptan las expresiones existentes, proponiéndose la incorporación de un factor de corrección, dependiente del porcentaje de árido reciclado empleado, que consiga una aproximación equivalente en las predicciones con hormigones reciclados a la obtenida con los hormigones convencionales.

## 2 TEMPERATURA Y HUMEDAD

Para el control de los ensayos se llevó a cabo un registro de las condiciones termohigrométricas del laboratorio (*Figura IV-1*), que varían dependiendo de la época de medida (verano/ invierno).

Las temperaturas si sitúan en el rango 10-23°C y las humedades relativas oscilan entre el 58% y el 89%, lo que supone valores medios de 15°C para la temperatura y 75% para la humedad.

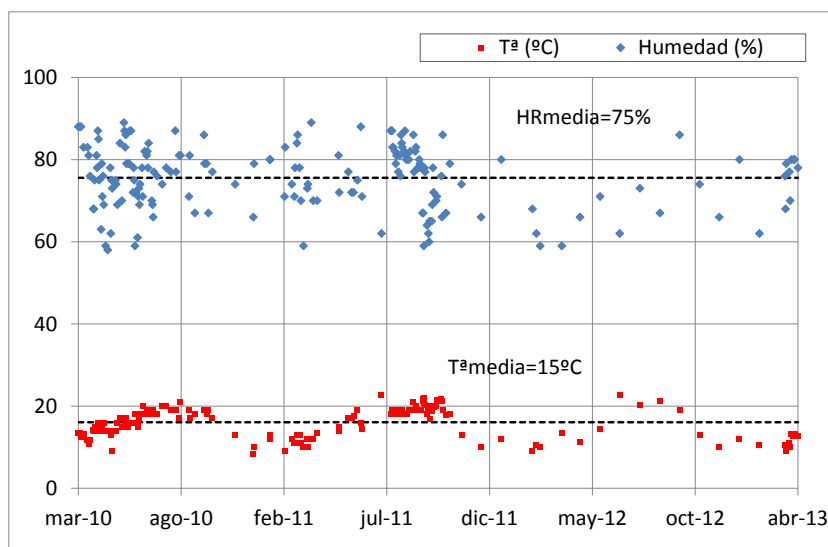


Figura IV-1. Condiciones ambientales del laboratorio. Humedad y temperatura

### 3 PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

En este punto se recogen la consistencia y densidad de los diferentes hormigones de estudio en estado fresco.

#### 3.1 Consistencia

El procedimiento utilizado para la pre-saturación de los áridos reciclados introdujo alguna diferencia en las relaciones agua-cemento efectiva de los diferentes hormigones, que repercuten, junto al aditivo, en su consistencia.

	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H65-0	H65-20	H65-50	H65-100
<b>a/c efectiva</b>	0.50	0.51	0.51	0.53	0.65	0.66	0.67	0.69
<b>% aditivo.</b>	1.03	1.17	1.20	0.87	0.85	1.20	1.07	1.00
<b>Consistencia (cm) UNE-EN 12350-2</b>	16	17	16	19	6	10	12	16

Tabla IV-1. Consistencia obtenida mediante asiento en cono de Abrams. Fase Vigas

A la vista de los datos recogidos en la *Tabla IV-1*, se constata que un aumento del contenido de árido grueso reciclado produce un incremento de la relación agua/cemento efectiva. Esto se debe, principalmente, a la dificultad de controlar con exactitud el grado de pre-saturación de los mismos.

#### 3.2 Densidad

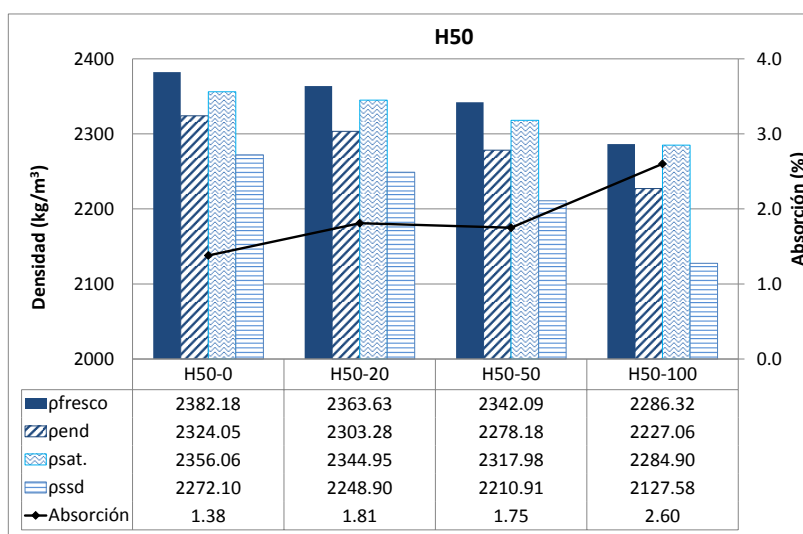
Se determinó la densidad en estado fresco de cada uno de los hormigones de estudio. Para ello, inmediatamente después de ser llenadas y compactadas, se pesaron todas las probetas fabricadas y, una vez desmoldadas, entre 24h y tres días después de su fabricación, se realizaron medidas de todas sus caras con el objetivo de determinar con exactitud sus dimensiones y volumen.

Los valores de densidad en estado fresco se presentan y analizan de forma conjunta a los obtenidos en estado endurecido (*Figura IV-2 y Figura IV-3*) en el siguiente apartado.

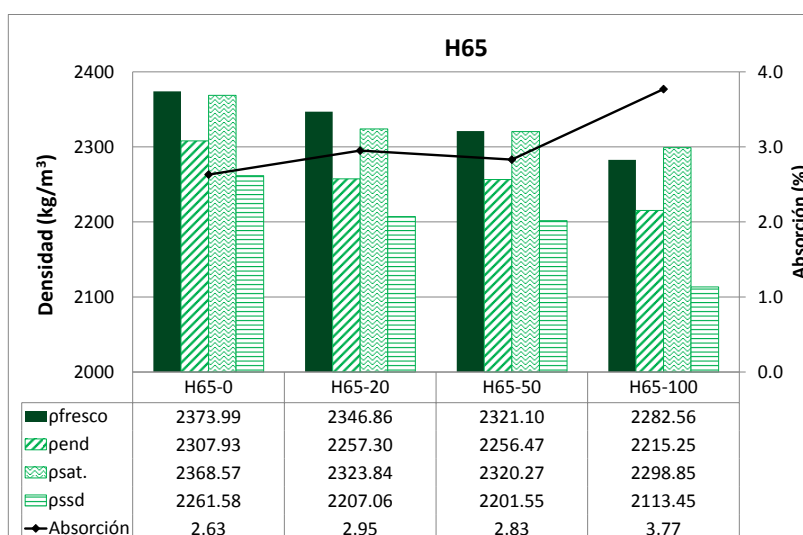
## 4 PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO

### 4.1 Propiedades físicas. Densidad y absorción

Se realizaron ensayos específicos de densidad y absorción a 28 días (*UNE-EN 12390-7*) sobre dos probetas cilíndricas de 10x20 cm, determinándose, en este caso, la absorción a 24 horas y las densidades del hormigón endurecido según se recibe ( $\rho_{\text{end}}$ ), saturado ( $\rho_{\text{sat.}}$ ) y tras secado en estufa ( $\rho_{\text{ssd}}$ ). Los resultados obtenidos se recogen en la *Figura IV-2* y la *Figura IV-3*.



*Figura IV-2. Densidad y absorción de los hormigones H50 a 28 días. Fase Vigas*



*Figura IV-3. Densidad y absorción de los hormigones H65 a 28 días. Fase Vigas*

Al igual que han observado otros autores [*DOMI10; LOPE09; GONZ08; ETXE07; ZEGA06*], al incrementarse el contenido de árido grueso reciclado el coeficiente de absorción aumenta y la densidad disminuye, tanto en estado fresco como endurecido, evaluada por cualquiera de los métodos (según se recibe, saturado y tras secado en estufa).

La densidad del hormigón endurecido según se recibe alcanza valores similares a los reflejados en la bibliografía existente, dentro del rango 2200 – 2400 kg/m<sup>3</sup>, con reducciones respecto del convencional en ambas series, H65 y H50, de entre el 4 y el 4.17% para los hormigones fabricados íntegramente con árido grueso reciclado (*Figura IV-4*). La densidad tras secado en estufa experimenta una reducción del 6% en los hormigones que sustituyen el 100% del árido grueso, porcentaje que se limita al 3% si se analiza la densidad saturada, y al 3.85 - 4% en el caso de la densidad en estado fresco.

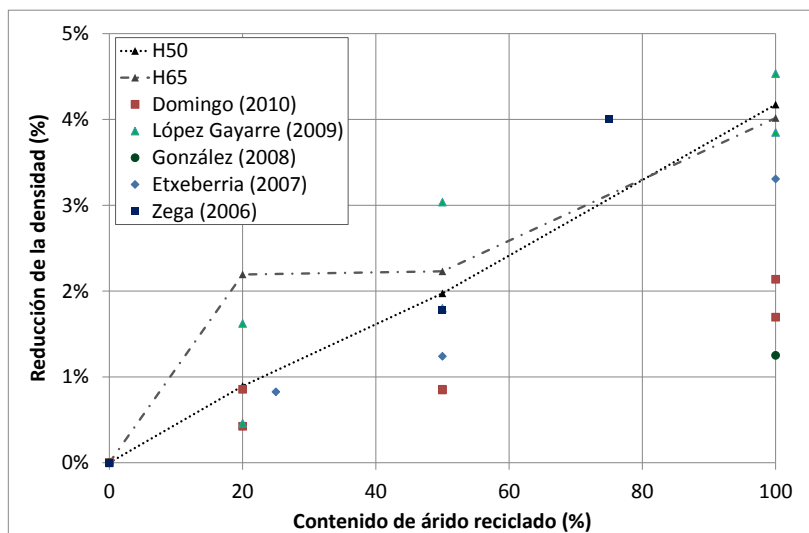


Figura IV-4. Reducción de la densidad del hormigón endurecido vs. contenido de árido reciclado

El análisis de la absorción revela, en ambas series, un comportamiento similar de los hormigones con porcentaje de sustitución del 20 y del 50%, que incrementan la absorción respecto del convencional un 30% en la serie H50 y un 10% en la serie H65. En los hormigones fabricados íntegramente con árido reciclado la absorción se incrementa hasta el 43% y el 88% para las series H65 y H50, respectivamente (*Figura IV-5*). La misma tendencia se observa en los resultados obtenidos por otros autores [KWAN12; LOPE09; GONZ08; ZEGA06], confirmándose que a partir de una sustitución parcial del 50% de árido reciclado la absorción aumenta considerablemente.

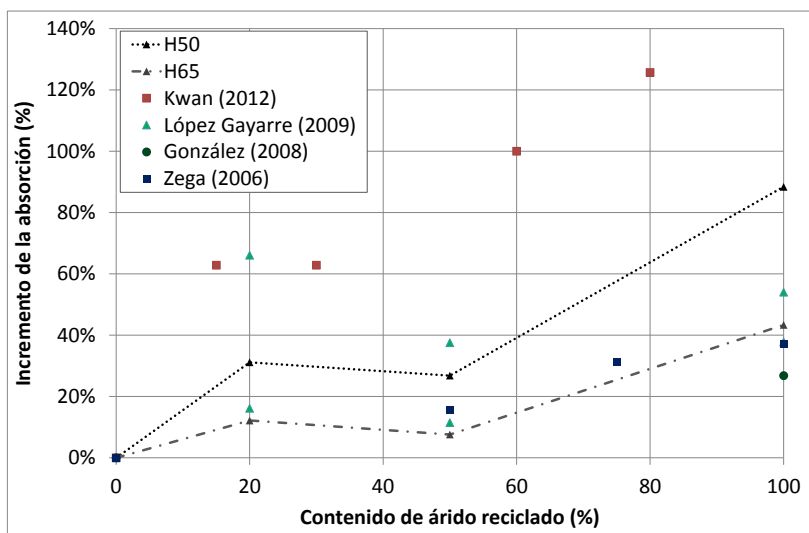
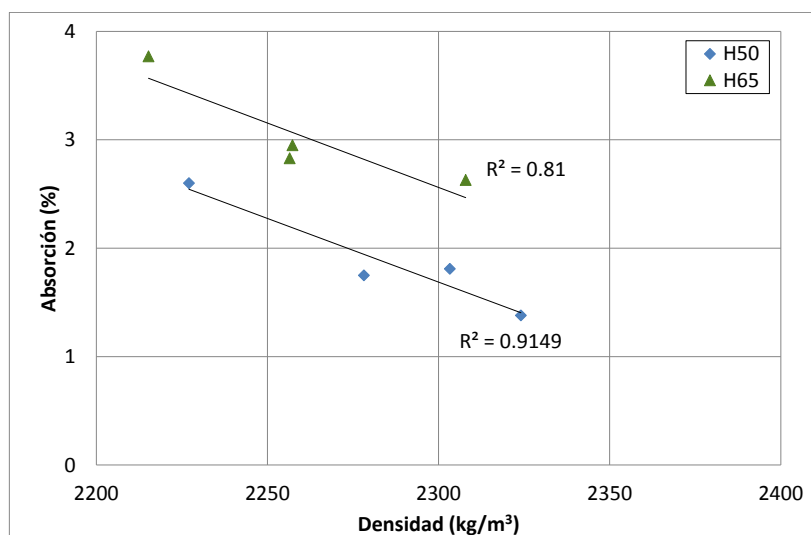


Figura IV-5. Incremento de la capacidad de absorción vs. contenido de árido reciclado

En la *Figura IV-6* se constata que el contenido de árido reciclado repercute más sobre la absorción en los hormigones de la serie H50 que en los de la H65. Ello se debe a que la capacidad de absorción del hormigón está condicionada por el porcentaje de sustitución de árido grueso natural por reciclado (incidencia de la absorción de los áridos) y también por la relación agua-cemento empleada.

Por último se analiza la relación entre la densidad endurecida según se recibe y la absorción del hormigón (*Figura IV-6*), constatándose, como era de esperar, una relación directa y cuasilineal entre ambas propiedades.



*Figura IV-6. Relación entre la densidad endurecida seco y la absorción*

## 4.2 Resistencia a compresión

Se ha determinado la resistencia a compresión de los diferentes hormigones de estudio con dos claros objetivos: definir su resistencia característica y establecer, sobre esta propiedad, la influencia del contenido de árido reciclado. Los valores experimentales obtenidos posibilitan, por un lado, el posterior análisis de resultados de los ensayos estructurales planteados y, por otro, la verificación de la bondad de expresiones propuestas por las actuales recomendaciones y normativas para la predicción teórica de resistencias, módulo de deformación y propiedades reológicas de hormigones con diferentes contenidos de árido reciclado.

Los resultados experimentales definen la resistencia a compresión media de los hormigones de estudio ( $f_{cm}$ ), pudiendo emplearse, también, para designar la resistencia característica ( $f_{ck}$ ) ya que, al tratarse de un trabajo de laboratorio, la desviación típica es siempre muy pequeña (*Tabla IV-2*).

Se obtuvieron las resistencias para dos edades diferentes, 28 y 42 días, coincidentes con la edad de ensayo de las vigas bajo cargas incrementales y con el inicio del ensayo bajo carga sostenida, respectivamente. Los resultados obtenidos para probetas cúbicas y cilíndricas, y el coeficiente de paso experimental “resistencia probeta cilíndrica/ resistencia probeta cúbica” a 28 días (*Figura IV-7*).

	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H65-0	H65-20	H65-50	H65-100
<b>Cilíndricas</b>	2.59	2.12	2.19	1.95	1.32	1.11	2.13	1.08
<b>Cúbicas</b>	1.76	0.47	3.32	2.08	1.42	0.56	0.67	0.72

*Tabla IV-2. Desviaciones típicas de la resistencia a compresión obtenida como media de tres probetas*

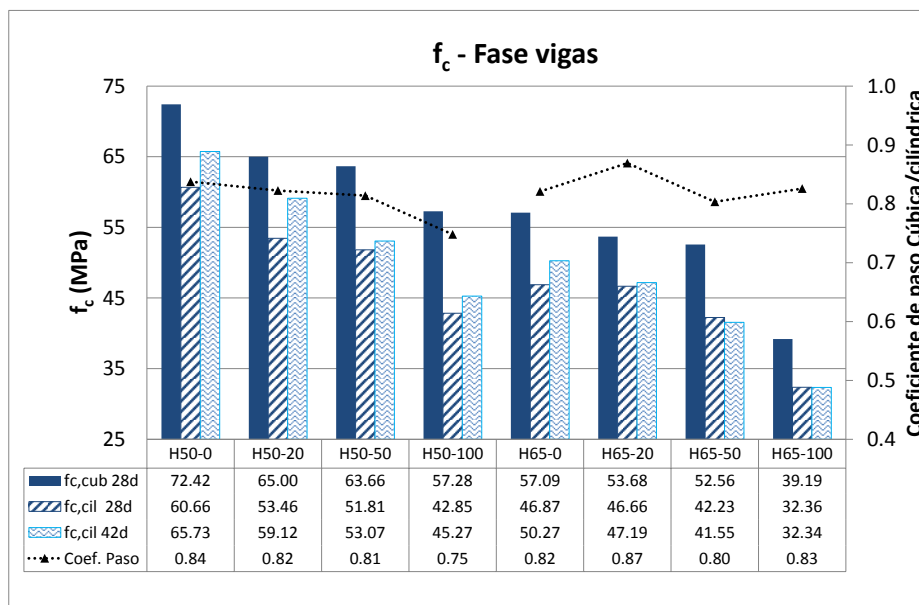


Figura IV-7. Resistencia a compresión. Fase Vigas

Tal como se ha constatado en el estado del arte, la resistencia disminuye con el porcentaje de árido grueso reciclado [MAS12; ETXE07; GONZ05; SANC05; PARR03]. En este caso, se observa cómo los hormigones con mayores resistencias (serie H50) experimentan disminuciones significativas incluso para porcentajes pequeños de sustitución de árido grueso natural por reciclado. Se aprecia una reducción de la resistencia a compresión del 11% para un contenido de árido reciclado del 20%, que alcanza el 14% y el 29%, respectivamente, para el 50% y 100% de sustitución. En la serie H65, sin embargo, sustituciones del 20% apenas disminuyen las resistencias, siendo más perceptible para sustituciones del 50% y 100 % con disminuciones del 10% y 31% respectivamente, inferiores en todo caso a las obtenidas con la serie H50 (Figura IV-8).

Diferentes autores [XIAO06, BRIT10] coinciden en señalar que la resistencia aumenta de modo prácticamente lineal con la densidad (Figura IV-9) y, por tanto, con la disminución de la absorción.

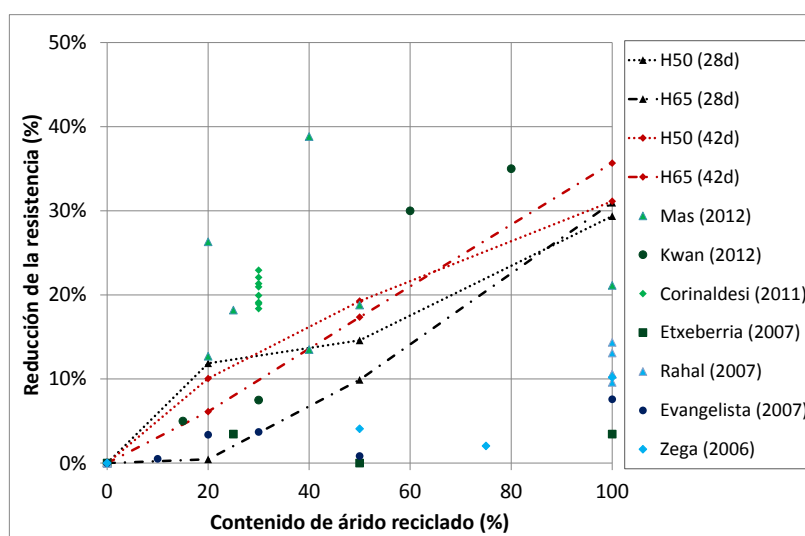


Figura IV-8. Reducción de la resistencia a compresión vs. Contenido de árido reciclado



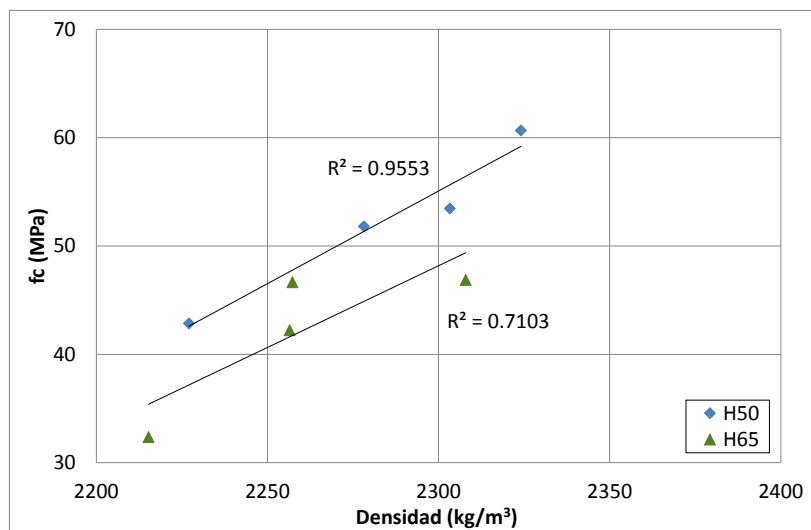


Figura IV-9. Relación entre la resistencia a compresión y la densidad endurecido seco

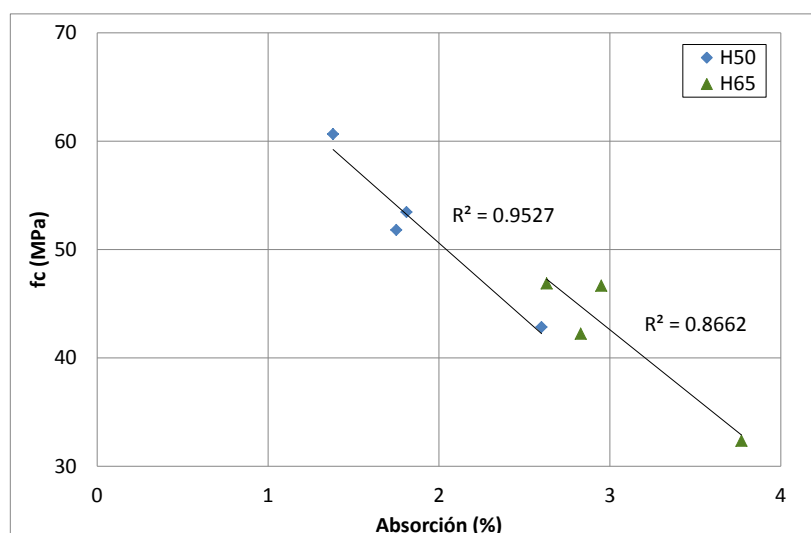


Figura IV-10. Relación entre la resistencia a compresión y la absorción

## 4.3 Resistencia a tracción

### 4.3.1 Resultados y análisis

La resistencia a tracción se obtuvo a partir del ensayo de tracción indirecta realizado sobre probeta cilíndrica. Los diferentes hormigones de estudio se ensayaron, como ya se ha indicado, a 28 y 42 días.

La Figura IV-11 muestra las resistencias a tracción obtenidas para cada hormigón, tras ser curadas a temperatura y humedad ambiente en el laboratorio.

Al igual que en la resistencia a compresión, se constata que la disminución en la resistencia a tracción indirecta aumenta con el contenido de árido reciclado [MAS12; LIX08]. Comparando los resultados obtenidos para ambas series, se puede apreciar que los hormigones de la serie H50 acusan más la influencia del contenido de árido reciclado que los de la serie H65. De esta forma, en la serie H50 se observan fuertes disminuciones de la resistencia a tracción que en los hormigones de la serie H65 se producen de forma más gradual.

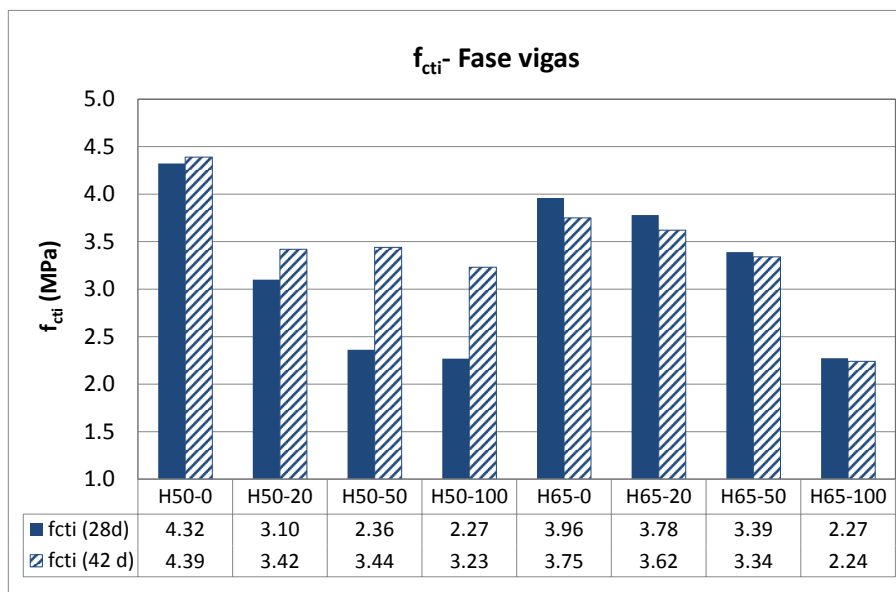


Figura IV-11. Resistencia a tracción indirecta. Fase Vigas

En la Figura IV-12 se compara, en términos de disminución porcentual, la resistencia a tracción experimental con la obtenida por otros autores para hormigones reciclados. Se observa una considerable dispersión de los resultados, tanto en los experimentales como en los obtenidos en otras investigaciones. Por una parte, algunos estudios reflejan una reducción brusca de la resistencia, incluso para tasas de sustitución bajas [MAS12], mientras que otros autores constatan, de manera puntual, una escasa influencia del contenido de árido reciclado en el hormigón [ZEGA06; KATZ03]. En este caso se observa una considerable reducción de la resistencia a tracción al incrementarse en el contenido de árido reciclado, con caídas superiores al 22% para sustituciones del 20% en la serie H50.

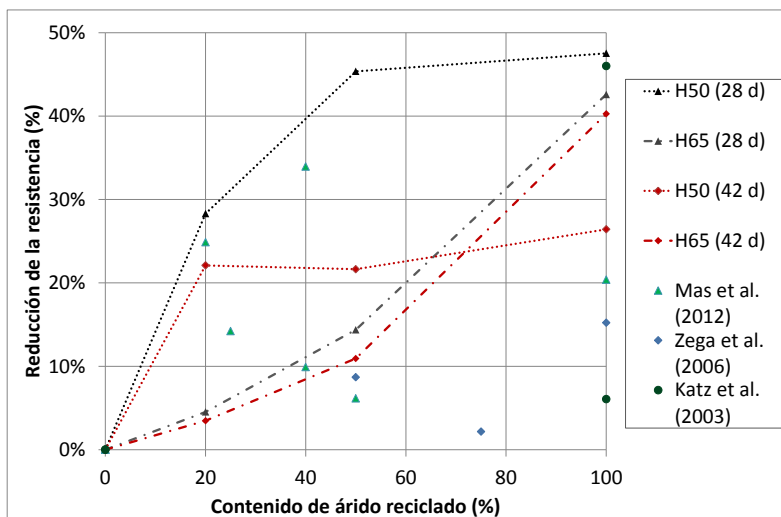


Figura IV-12. Reducción de la resistencia a tracción indirecta vs. contenido de árido reciclado

#### 4.3.2 Estimación de la resistencia a tracción

Diferentes códigos y normas proponen expresiones matemáticas que permiten estimar la resistencia a tracción del hormigón a partir de  $f_c$ . Para este análisis se utilizan las expresiones

recogidas en las normas internacionales MC-10, EC-2 y ACI-318, y en las nacionales EHE-08 y NTC-08 (Tabla IV-3).

	$f_{ct} \leq 50 \text{ MPa}$	$f_{ct} > 50 \text{ MPa}$
<b>EHE-08</b>	$f_{ct} = 0.3 f_{ck}^{2/3}$	$f_{ct} = 0.58 f_{ck}^{1/2}$
<b>EC-2</b>	$f_{ct} = \frac{1}{3} \cdot f_{ck}^{2/3}$	
<b>MC-10 / NTC-08<sup>1</sup></b>	$f_{ct} = 0.3 f_{ck}^{2/3}$	
<b>ACI-318</b>	$f_{ct} = 0.59 f_{ck}^{1/2}$	

Tabla IV-3. Expresiones normativas para la estimación de la resistencia a tracción

La Figura IV-13 y la Figura IV-14 recogen los resultados experimentales y teóricos (calculados utilizando las expresiones normativas y empíricas propuestas por otros autores), obtenidos para ambas series de hormigón. Conviene aclarar que ambas gráficas se construyen a partir de las resistencias a compresión obtenidas con cada tipo de hormigón. Así se observa, para ambas series, un descenso de la resistencia a tracción teórica según se incrementa el contenido de árido reciclado, debido evidentemente a la pérdida de resistencia a compresión a que conduce la mayor proporción de árido reciclado. Sin embargo, la caída de resistencias experimentales no se produce en la misma medida que las teóricas, por lo que las ratios “tracción experimental/ tracción teórica” obtenidas con los hormigones reciclados difieren de las obtenidas con los convencionales, disminuyendo al crecer porcentaje de árido reciclado utilizado.

Analizando la bondad de las expresiones normativas propuestas a través de las ratios “tracción experimental/ tracción teórica” (Tabla IV-4), se constata que la propuesta del EC-2 es la que ofrece una ratio menor, tanto en los hormigones reciclados como en los convencionales. En el extremo opuesto, con los valores más altos, se encuentran el MC-2010 y la NTC-08, que adoptan la misma expresión y, finalmente, entre ambos grupos, se sitúan la EHE-08 y la ACI-318.

	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H65-0	H65-20	H65-50	H65-100
<b>EHE-08</b>	1.37	1.04	0.81	0.88	1.45	1.39	1.33	1.07
<b>MC-10</b>	1.49	1.13	0.87	0.88	1.45	1.39	1.33	1.07
<b>NTC-08</b>	1.49	1.13	0.87	0.88	1.45	1.39	1.33	1.07
<b>ACI-318</b>	1.34	1.03	0.79	0.84	1.40	1.34	1.26	0.97
<b>EC2</b>	1.20	0.94	0.73	0.79	1.31	1.25	1.20	0.96

Tabla IV-4. Resistencia a tracción. Ratio “tracción experimental/ tracción teórica”

Conscientes de la inexactitud que ofrecen las expresiones actuales, definidas para hormigones convencionales, algunos autores han propuesto formulaciones específicas para hormigones reciclados en las que, introduciendo el contenido de árido reciclado, se predice la resistencia tracción a partir de la de compresión con una aproximación similar a la de los convencionales (Tabla IV-5).

Los resultados obtenidos con las fórmulas de estos autores [XIAO06; LIO8], en las que se han introducido los valores de la resistencia a compresión sobre probeta cúbica ( $f_{cu}$ ) y en algún caso también el porcentaje de sustitución empleado en tanto por uno ( $r$ ). Los resultados obtenidos se han comparado con los valores experimentales (Figura IV-13 y Figura IV-14).

<sup>1</sup> La normativa italiana NTC-08 adopta la fórmula propuesta en el MC-10.

Autor (año)	Fórmula propuesta
Xiao et al (2006)	$f_{sp} = 0.24 f_{cu}^{0.64}$
Li (2008)	$f_{ct} = (0.24 - 0.06r) f_{cu}^{2/3}$

Tabla IV-5. Expresiones empíricas propuestas por diversos autores para la predicción de la resistencia a tracción

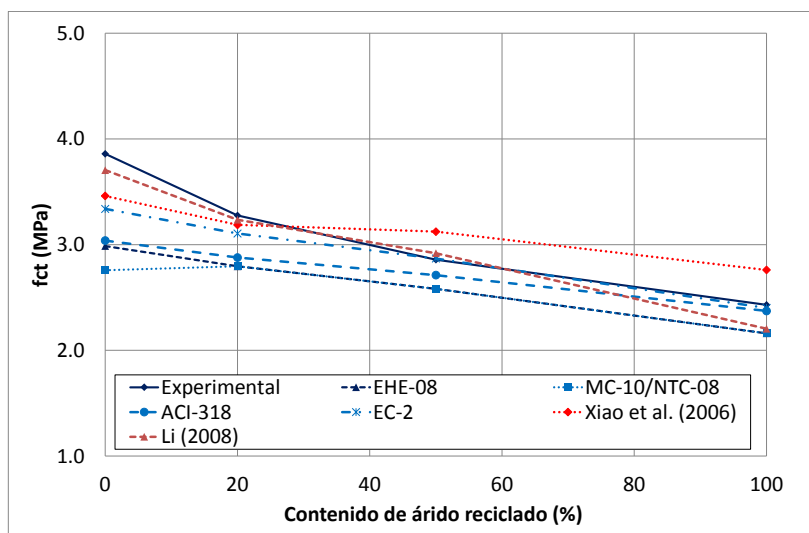


Figura IV-13. Resistencia a tracción. Estimación normativa, propuestas empíricas y resultados experimentales. H50

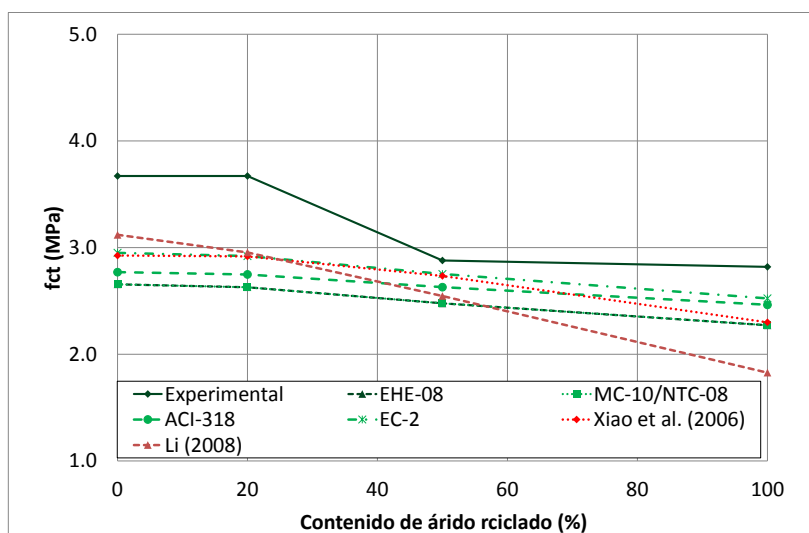


Figura IV-14. Resistencia a tracción. Estimación normativa, propuestas empíricas y resultados experimentales. H65

Resulta obvio, por tanto, que para mantener en hormigones reciclados las mismas ratios “tracción experimental/ tracción teórica” que en los convencionales es necesario introducir correcciones a las expresiones propuestas en las normativas. En su mayoría, las expresiones normativas predicen el valor de la resistencia a tracción de un hormigón a partir de la de compresión utilizando ecuaciones del tipo que se muestra a continuación (IV-1). Así, con esta ecuación se obtuvieron los coeficientes que permiten calcular la resistencia de tracción de los hormigones reciclados en función del porcentaje de sustitución de árido grueso natural por reciclado

empleado con la misma ratio, “*tracción experimental/ tracción teórica*”, que en los hormigones convencionales. Este coeficiente corrector se determinó mediante un ajuste por regresión lineal (Figura IV-15), teniendo en cuenta los resultados experimentales de aquellos hormigones con resistencia a compresión menor o igual a 50MPa.

$$f_{ct} = \text{Coeficiente } f_{cm}^{2/3} \quad (IV-1)$$

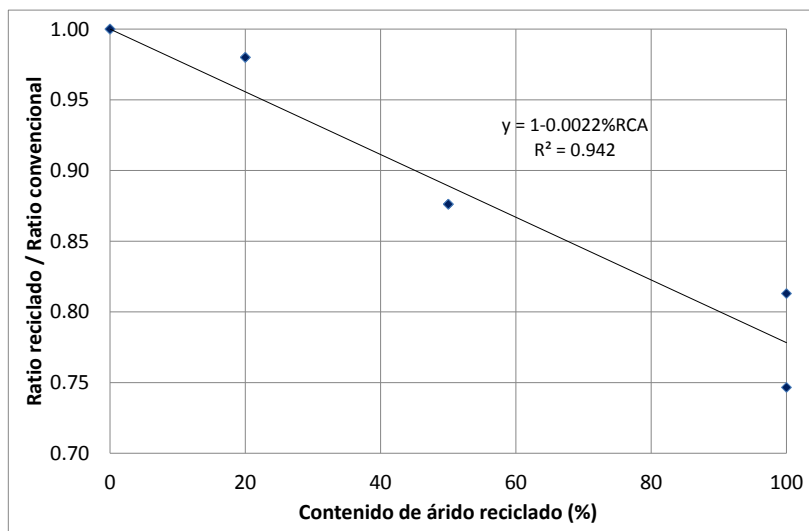


Figura IV-15. Ajuste del coeficiente corrector para la predicción de la resistencia a tracción

Aplicando el coeficiente corrector calculado a la expresión normativa que propone el Eurocódigo-2 se obtiene finalmente la ecuación (IV-2), propuesta para la predicción teórica de la resistencia a tracción en los hormigones reciclados con distintos porcentajes de sustitución (%RCA, en tanto por uno). Este coeficiente corrector puede aplicarse a las diferentes expresiones normativas recogidas en Códigos y normas para el cálculo de la resistencia a tracción de un hormigón.

$$f_{ct} = \left( \frac{f_c^{2/3}}{3} \right) (1 - 0.22 \%RCA) \quad (IV-2)$$

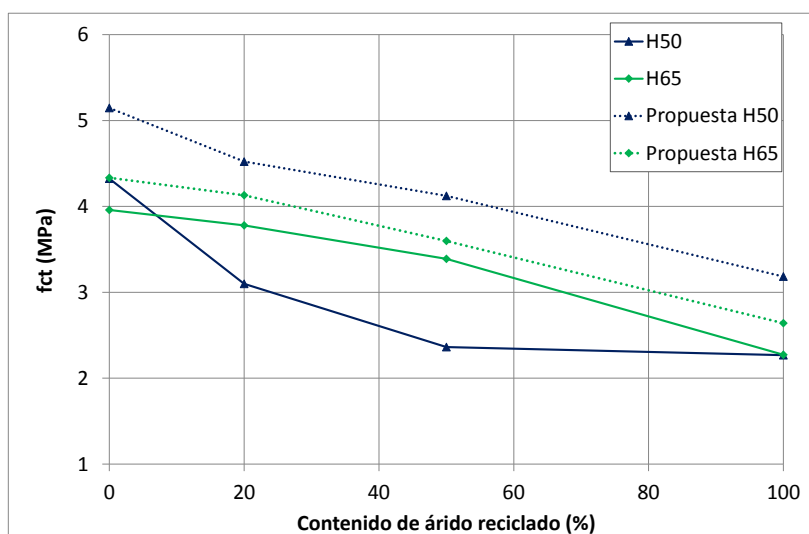


Figura IV-16. Resistencia a tracción. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales

## 4.4 Módulo de deformación elástico longitudinal y transversal

### 4.4.1 Resultados y análisis

Se determinaron los valores de módulo de deformación longitudinal ( $E_c$ ) y transversal ( $\nu$ ) a 28 y 42 días para los diferentes hormigones de estudio. En la *Figura IV-17* se muestran los resultados obtenidos.

Como ocurría con las resistencias mecánicas, se ha observado que el módulo de deformación disminuye al crecer el contenido de árido reciclado, en ambas edades. Respecto al hormigón de control, la reducción se sitúa entre el 29 y el 34% en los hormigones fabricados íntegramente con árido reciclado.

Las variaciones porcentuales obtenidas en esta campaña experimental están dentro de los rangos habituales (*Figura IV-18*), obteniendo otros autores resultados similares [ZEGA06] o, en algún caso, con disminuciones menos acusadas [DOMI10; ETXE07].

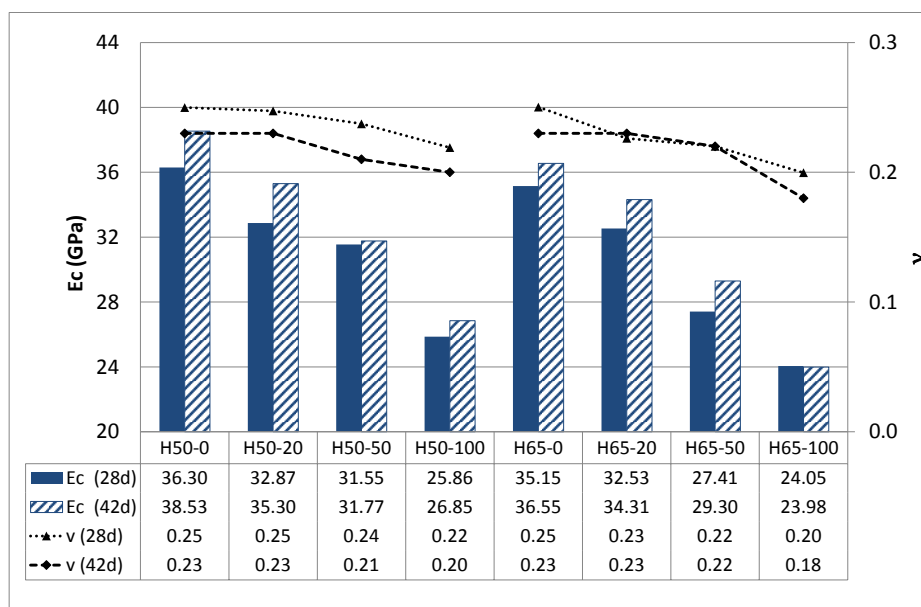


Figura IV-17. Módulo de deformación longitudinal y transversal. Fase Vigas

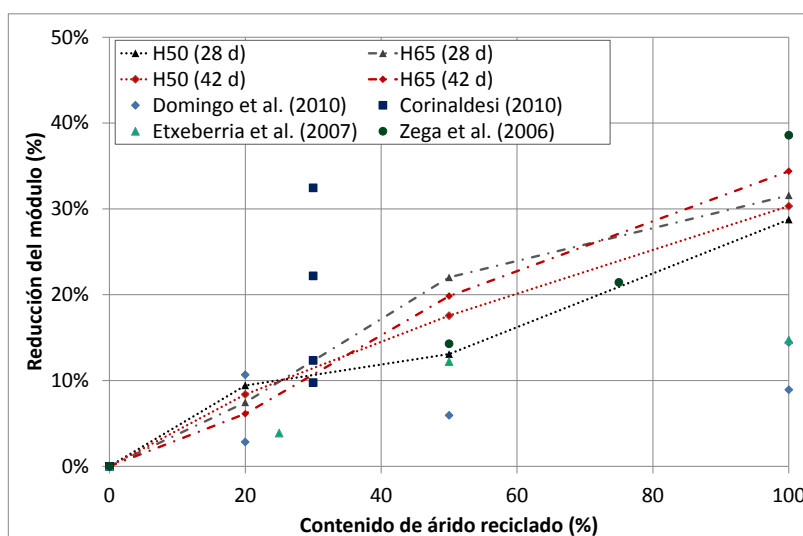


Figura IV-18. Reducción del módulo de deformación longitudinal vs. contenido de árido reciclado

#### 4.4.2 Estimación del módulo de deformación longitudinal

A partir de la resistencia a compresión del hormigón suelen estimarse gran parte de sus propiedades mecánicas. En la *Tabla IV-6* se recogen algunas de las ecuaciones propuestas por diferentes normas y códigos para evaluar el módulo de deformación en los hormigones convencionales. Como se ha hecho con la resistencia a tracción, estas expresiones se han aplicado para cada tipo de hormigón introduciéndose como variable el valor de  $f_c$  determinado experimentalmente. De esta forma se ha obtenido el valor de  $E_c$  teórico de cada hormigón y se ha representado gráficamente su relación con el porcentaje de árido grueso reciclado empleado (*Figura IV-19* y *Figura IV-20*).

Se constata así que el módulo  $E_c$  teórico se reduce al crecer el porcentaje de árido reciclado, debido, esencialmente a las reducciones de la resistencia. Sin embargo, como ocurría con la resistencia a tracción la caída de módulos experimental no se produce en la misma medida que las teóricas, de forma que las ratios “*módulo experimental/ módulo teórico*” obtenidas con los hormigones reciclados se desvían más que las obtenidas con los convencionales, especialmente al crecer el porcentaje de árido reciclado utilizado.

Expresión	
<b>EHE-08</b>	$E_c = 8500 f_{cm}^{1/3}$
<b>EC-2/NTC-08<sup>2</sup></b>	$E_c = 22000 \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3}$
<b>MC-10</b>	$E_c = 21500 \alpha_E \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3}$
<b>ACI-318</b>	$E_c = 4700 \sqrt{f_{cm}}$

Tabla IV-6. Expresiones normativas para estimación del módulo de deformación longitudinal

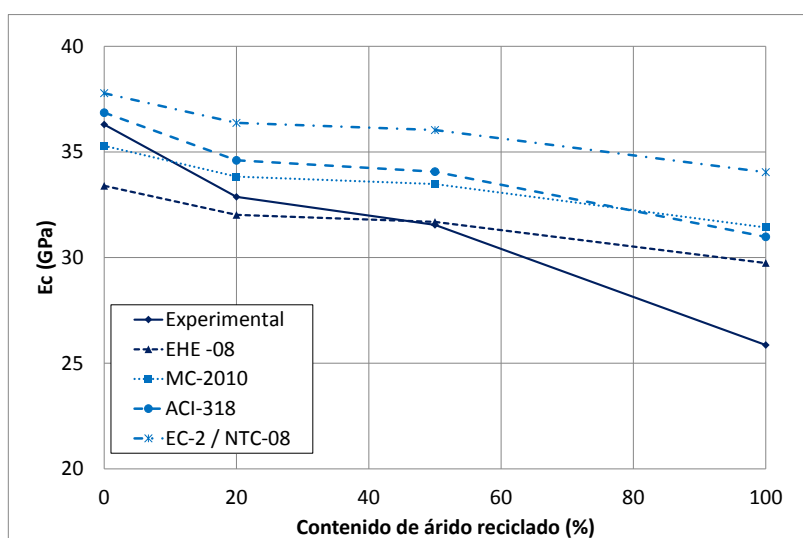


Figura IV-19. Módulo de deformación longitudinal. Estimación normativa y resultados experimentales. H50

<sup>2</sup> La normativa italiana NTC-08 adopta la fórmula propuesta en el MC-10 para estimar la resistencia a tracción del hormigón a partir de su resistencia a compresión.

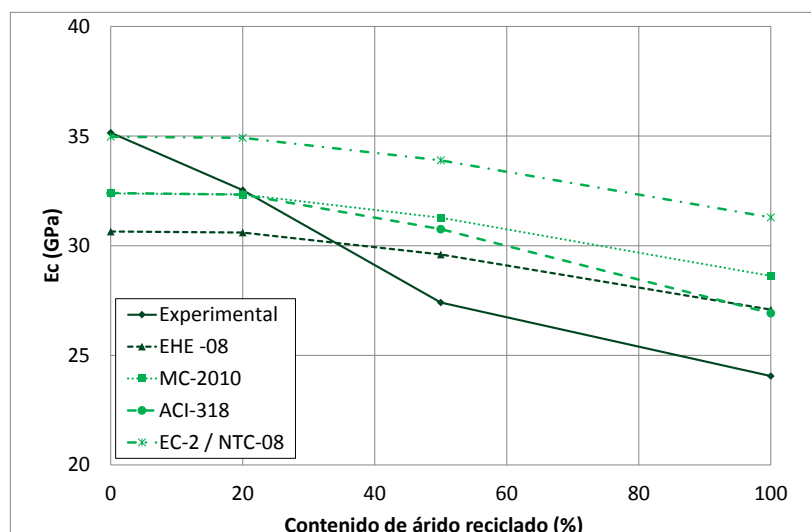


Figura IV-20. Módulo de deformación longitudinal. Estimación normativa y resultados experimentales. H65

Estudiando los valores de las ratios “*módulo experimental/ módulo teórico*”, se constata que las propuestas del EC-2 y NTC-08 son la que ofrecen una ratio mayor, tanto en los hormigones reciclados como en los convencionales. En el extremo opuesto, con las ratios menores, se encuentran el MC-10 y la ACI-318. Se observa, también, que las ratios obtenidas en hormigones con el 50% y 10% de sustitución son, en todos los casos, inferiores a uno (*Tabla IV-7*).

	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H65-0	H65-20	H65-50	H65-100
<b>EHE-08</b>	1.09	1.03	1.00	0.87	1.15	1.06	0.93	0.89
<b>MC-10</b>	1.03	0.97	0.94	0.82	1.09	1.01	0.88	0.84
<b>ACI-318</b>	0.98	0.95	0.93	0.83	1.08	1.01	0.89	0.89
<b>NTC-08</b>	0.96	0.90	0.88	0.76	1.01	0.93	0.81	0.77
<b>EC-2</b>	0.96	0.90	0.88	0.76	1.01	0.93	0.81	0.77

Tabla IV-7. Módulo de deformación longitudinal. Ratio “*módulo experimental / módulo teórico*”

Se concluye, por tanto, que resulta necesario establecer un coeficiente corrector o expresión modificada para la predicción teórica del módulo de deformación que, teniendo en cuenta el porcentaje de sustitución del árido empleado, proporcione ratios “*módulo experimental/ módulo teórico*” similares en hormigones reciclados y convencionales.

Conscientes de esta necesidad, en las últimas décadas algunos autores [RAVI85; KAZI88; DILL98; DHIR99; MELL99; ZILC01; CORI10; GONZ11] han desarrollado expresiones específicas para la estimación del módulo de deformación elástico longitudinal en los hormigones reciclados (*Tabla IV-8*). Los resultados obtenidos con las fórmulas (*Tabla IV-8*) de estos autores se han comparado con los valores experimentales (*Figura IV-21* y *Figura IV-22*), obteniéndose, en algunos casos [GONZ11], resultados muy ajustados a los experimentales.



Autor y año	Expresión
<b>González-Fonteboa et al. (2011)</b>	$E_c = 22000 \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3} (1 - 0.0020\%RCA)$
<b>Corinaldesi (2010)</b>	$E_c = 18800 \sqrt[3]{\frac{0.83f_{cu}}{10}}$
<b>Zilch &amp; Roos (2001)</b>	$E_c = 9100 (f_{cu} + 8)^{1/3} \left( \frac{\rho}{2400} \right)^2$
<b>Dhir et al. (1999)</b>	$E_c = 370 f_{cu} + 13100$
<b>Mellmann (1999)</b>	$E_c = 378 f_{cu} + 8242$
<b>Dillmann (1998)</b>	$E_c = 634.43 f_{cu} + 30576$
<b>Kazikaki et al. (1988)</b>	$E_c = 19000 \left( \frac{\rho}{2300} \right)^{1.5} \sqrt{\frac{f_{cu}}{2000}}$
<b>Ravindrarajah &amp; Tam (1985)</b>	$E_c = 7700 f_{cu}^{0.33}$

Tabla IV-8. Expresiones empíricas para la predicción del módulo de deformación longitudinal

Todas las expresiones propuestas por las normativas estiman el valor del módulo de deformación a partir de la resistencia a compresión del hormigón objeto de estudio, utilizando, la mayoría, expresiones del tipo que se muestra en la ecuación (IV-3).

$$E_c = 22000 \left( \frac{f_c}{10} \right)^{0.3} \quad (IV-3)$$

Con los resultados de esta campaña se ha ajustado un factor que depende del porcentaje de sustitución de árido reciclado y permite que, para hormigones reciclados y convencionales (*porcentaje nulo*), se consigan niveles de ajuste del módulo teórico equivalentes, evaluados mediante el análisis de la ratio “*módulo experimental/ módulo teórico*”. Elegida la expresión particular del Eurocódigo 2 (*coeficiente* = 22000), y aplicando técnicas de regresión, se ha obtenido el factor  $[1 - 0.0024 \cdot \%RCA]$ , que multiplicado por el coeficiente conduce al valor más alto de  $R^2$  (coeficiente de variación de Pearson) (Figura IV-23).

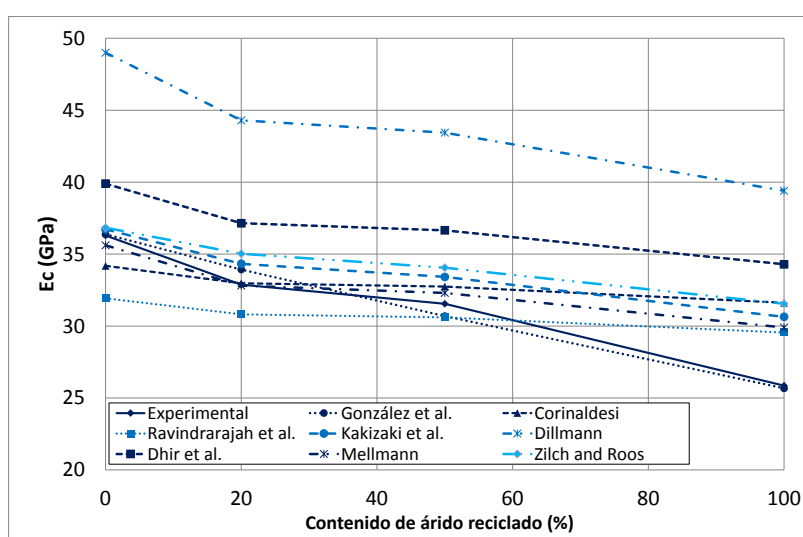


Figura IV-21. Módulo de deformación longitudinal. Estimación con propuesta de autores y resultados experimentales. H50

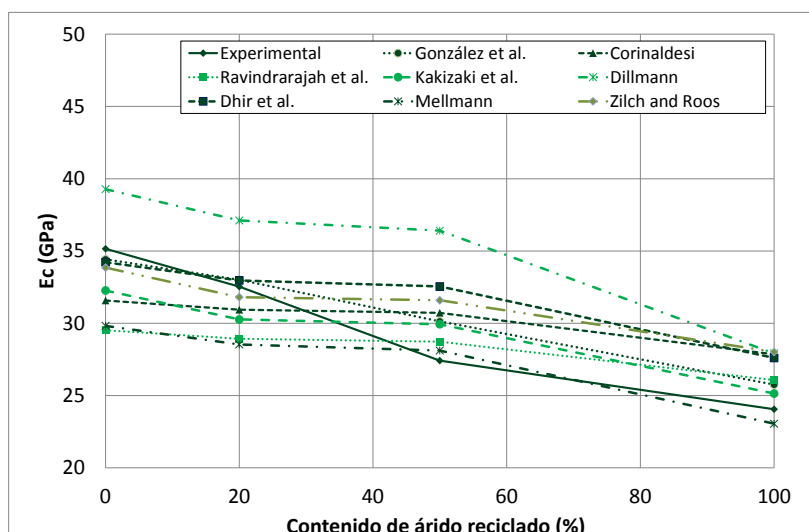


Figura IV-22. Módulo de deformación longitudinal H65. Estimación con propuesta de autores y resultados experimentales. H65

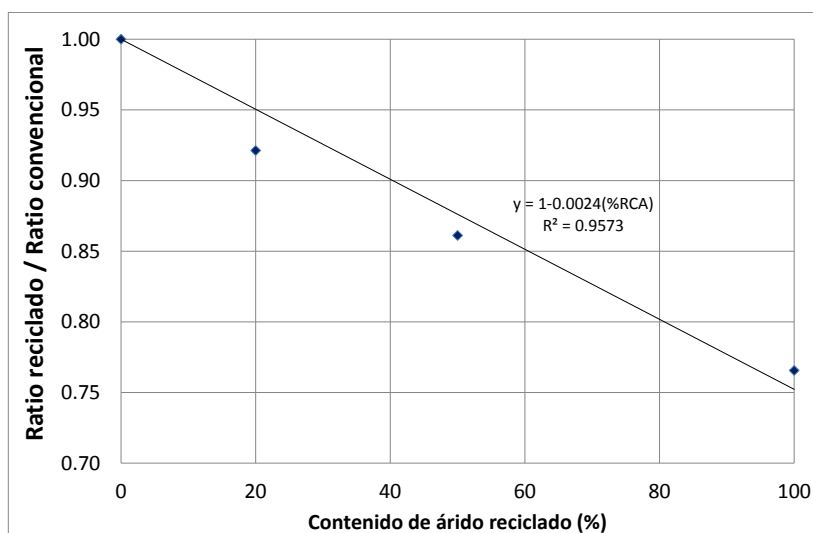


Figura IV-23. Ajuste del coeficiente corrector para la predicción del módulo de deformación longitudinal

La expresión que se ha obtenido la ecuación (IV-4) difiere ligeramente de la propuesta a partir de ensayos realizados en una fase previa de la investigación [GONZ11]. Las pequeñas diferencias se deben, esencialmente a que en esa fase todos los áridos gruesos, naturales y reciclados, se introducían pre-saturados en la amasadora.

$$E_c = 22000 \left( \frac{f_c}{10} \right)^{0.3} (1 - 0.24 \%RCA) \quad (IV-4)$$

Aplicando la ecuación (IV-4) se obtienen los módulos  $E_c$  recogidos en la Figura IV-24, para distintos porcentajes de sustitución del árido grueso natural por reciclado (%RCA, en tanto por uno). El factor deducido podría aplicarse también a las expresiones recogidas en otros códigos o normas [MC-10; NTC-08; EHE-08].

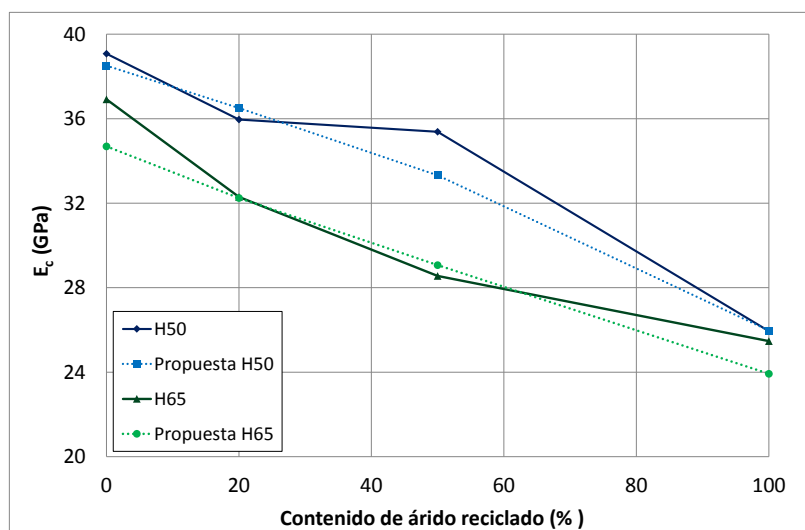


Figura IV-24. Módulo de deformación longitudinal. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales

## 4.5 Diagrama tensión-deformación

### 4.5.1 Resultados y análisis

Además de determinarse los valores de resistencia y módulo, se definió la curva tensión-deformación para cada uno de los hormigones estudiados. La obtención de estos diagramas se llevó a cabo mediante el ensayo de probetas cilíndricas por dos procedimientos diferentes (control por carga y control por desplazamiento) a 28 y 42 días. En ambos casos se registraron las deformaciones a partir de galgas extensométricas adheridas longitudinalmente en el exterior de la probeta. Para el ensayo en control por deformación se añadieron, además, transductores extensométricos exteriores situados sobre dos generatrices opuestas de la probeta, coincidentes con la situación de las galgas.

Las curvas tensión-deformación obtenidas en control por carga permiten identificar la deformación de pico ( $\epsilon_{c0}$ ), correspondiente a la máxima tensión alcanzada en cada probeta a 28 y 42 días (Figura IV-25).

La presencia de árido reciclado influye significativamente sobre las propiedades deformacionales de los hormigones, hecho que se traduce en una curva  $\sigma$ - $\epsilon$  más tendida, mayores deformaciones de pico, y menor pendiente de la rama elástica (*menor módulo  $E_c$ , como ya se ha visto*). Diferentes autores coinciden en señalar que la mayor deformabilidad de los hormigones reciclados puede atribuirse a la presencia de mortero adherido en los áridos y a la consiguiente existencia de una interfaz pasta-árido menos rígida que el árido natural [XIAO05; LI08; GONZ11].

El ensayo bajo control por desplazamiento permite determinar, además de la deformación de pico, la deformación última ( $\epsilon_{cu}$ ), cuyo valor se obtiene a partir de las medidas registradas por los transductores de desplazamiento durante la rama post-pico. Numerosos códigos y normativas [EHE-08; EC-2] fijan esta deformación en el 3.5‰ para hormigones convencionales de resistencias no superiores a 50 MPa, coincidente con una tensión aproximada del 60% de  $f_c$  en la rama de descarga.

A partir de los ensayos bajo control por desplazamiento se han obtenido las curvas tensión-deformación experimentales, a 28 y 42 días de edad, para los diferentes hormigones de estudio (Figura IV-26 y Figura IV-27).

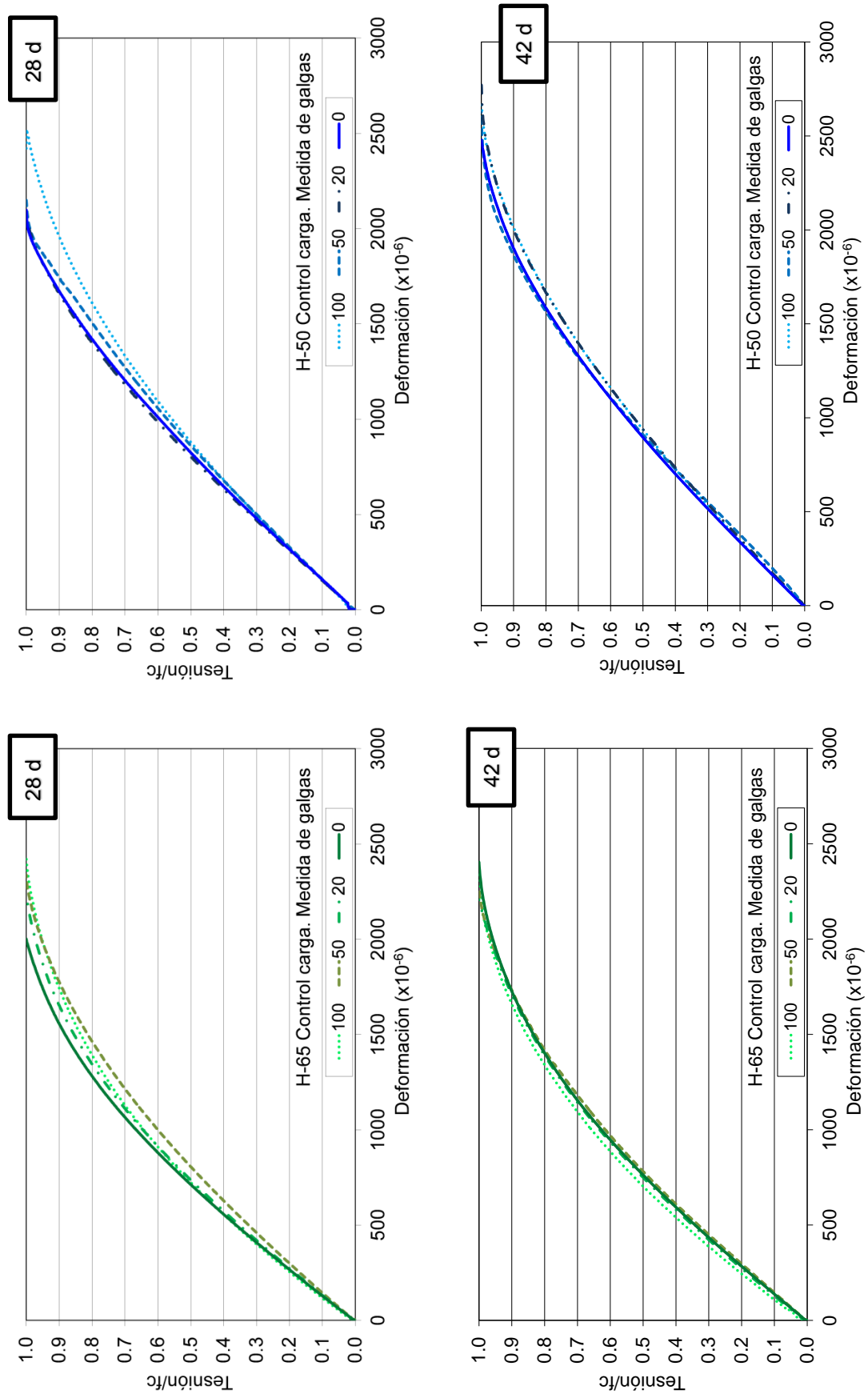


Figura IV-25. Diagrama Tensión - deformación en control por carga a 28 y 42 días. Fase Vigas

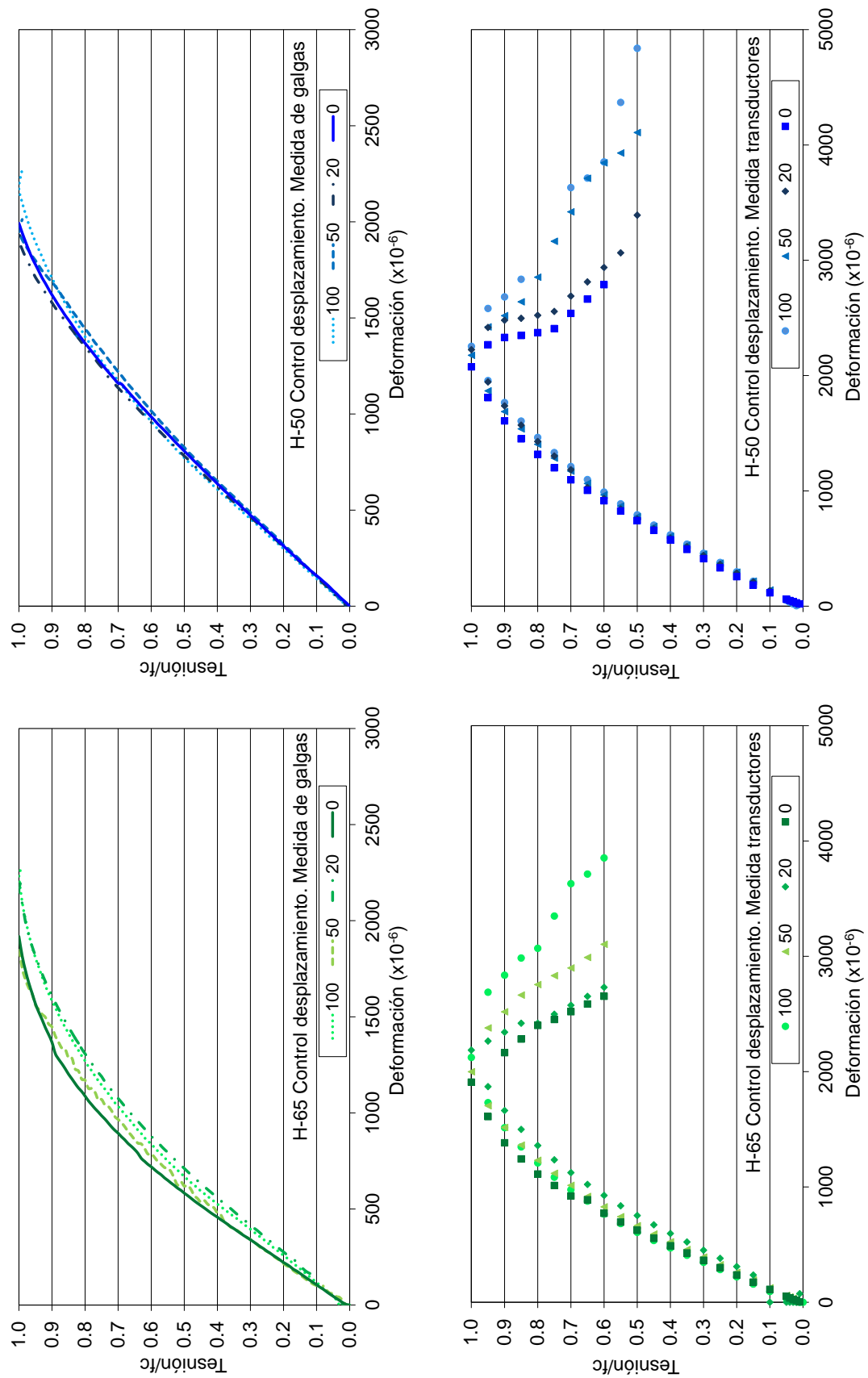


Figura IV-26. Diagrama tensión - deformación en control por desplazamiento a 28 días. Fase Vigas

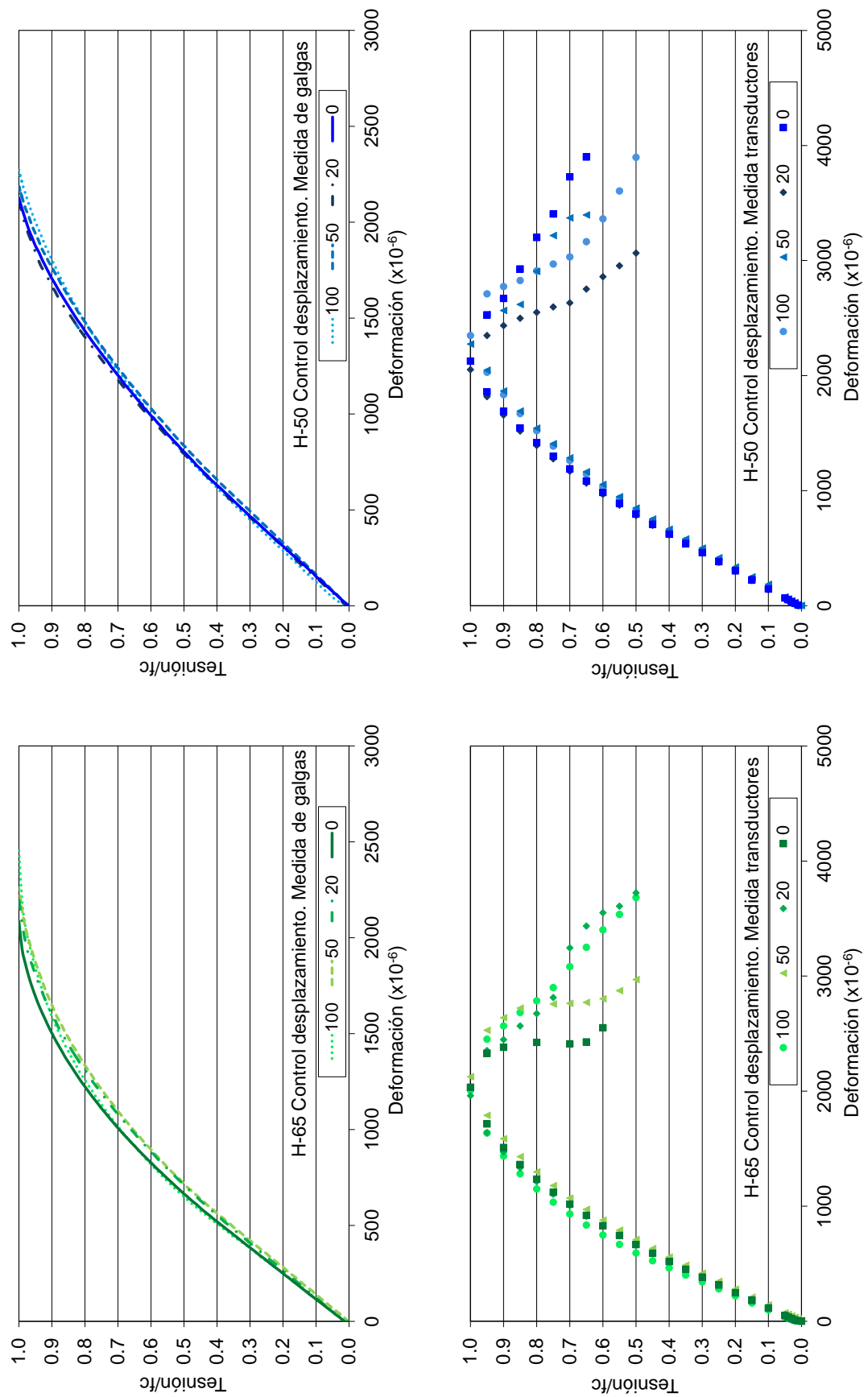


Figura IV-27. Diagrama tensi3n - deformaci3n en control por desplazamiento a 42 d3as. Fase Vigas

De nuevo se constata un ligero incremento de las deformaciones en los hormigones reciclados frente a los de control con el aumento del porcentaje de sustitución. Esta tendencia se mantiene en ambas series de hormigón, tanto para las deformaciones de pico, asociadas a la máxima tensión que soporta el hormigón, como para las deformaciones últimas, registradas en la rama de descarga.

Con el fin de cuantificar la influencia del árido reciclado en el diagrama tensión - deformación ( $\sigma$ - $\epsilon$ ), se recogen en la *Tabla IV-9* los valores medios de las deformaciones de pico y última, y en la *Figura IV-28* los porcentajes de aumento de la deformación en los hormigones reciclados respecto a su correspondiente convencional.

Def. (‰)	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H65-0	H65-20	H65-50	H65-100
$\epsilon_{c0}$ (28 días)	1.99	2.11	2.14	2.46	1.95	2.19	2.17	2.31
$\epsilon_{c0}$ (42 días)	2.24	2.32	2.36	2.44	2.06	2.13	2.21	2.27
$\epsilon_{cu}$ (28 días)	3.10	3.44	3.44	3.75	2.88	3.10	3.37	3.42
$\epsilon_{cu}$ (42 días)	3.19	3.39	3.85	3.85	2.80	3.42	3.38	3.40

Tabla IV-9. Deformación de pico ( $\epsilon_{c0}$ ) y última ( $\epsilon_{cu}$ ). Fase Vigas

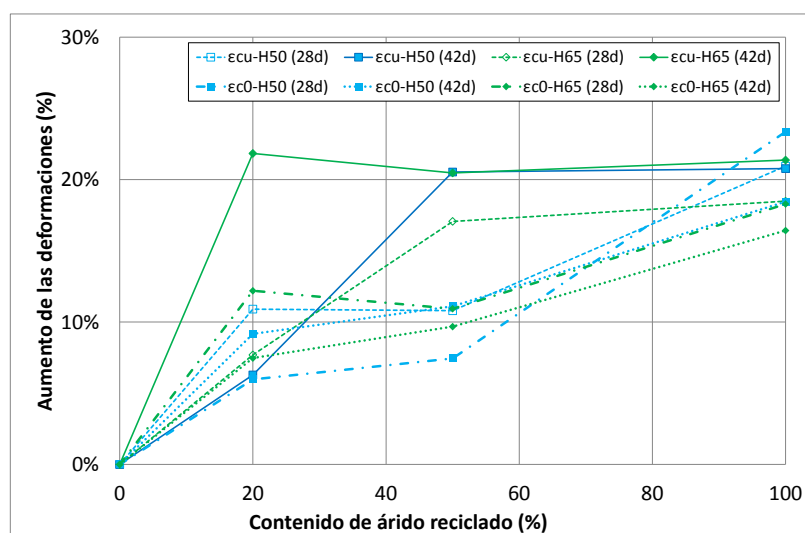


Figura IV-28. Incremento de la deformación de pico y última vs. contenido de árido reciclado

#### 4.5.2 Estimación de la deformación de pico y última

Las distintas normas y códigos proporcionan expresiones que permiten calcular la deformación del hormigón en función de su resistencia a compresión, estableciendo como valores habituales un 2‰ para la deformación de pico ( $\epsilon_{c0}$ ) y un 3.5‰ para la última ( $\epsilon_{cu}$ ), según se presenta en la *Tabla IV-10*.

En la *Figura IV-29* y la *Figura IV-30* se recogen las estimaciones teóricas de las deformaciones de pico y última calculadas con las propuestas normativas para hormigones convencionales. A partir de los resultados experimentales y los valores teóricos, se obtuvieron los ratios “deformación experimental/ deformación teórica”, *Tabla IV-11* y *Tabla IV-12*. Este coeficiente disminuye, en ambos casos, al aumentar el contenido de árido grueso reciclado. Teniendo en cuenta la disminución de la ratio “deformación experimental/ deformación teórica” al crecer el contenido de árido reciclado, y con la intención de mantener las mismas ratios (independientemente de su exactitud) en hormigones reciclados y convencionales, se constata

## CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN

la necesidad de establecer un coeficiente corrector sobre las expresiones teóricas de las diferentes normas para el cálculo de la deformación de pico y última al emplearse árido reciclado.

	$\epsilon_{cu}$ (‰)	$\epsilon_{c0}$ (‰)
<b>EC-2/ EHE-08<sup>3</sup></b>	2.6-3.5 (Según clase resistente)	2-2.6 (Según clase resistente)
<b>MC-10/ NTC-08<sup>4</sup></b>	3 – 3.5 (Según clase resistente)	1.8 – 3 (Según clase resistente)
<b>ACI-318</b>	3	--

Tabla IV-10. Expresiones normativas para estimación de la deformación de pico y última

$\epsilon_{c0}$	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H65-0	H65-20	H65-50	H65-100
<b>EC-2/EHE-08</b>	0.80	0.88	0.90	1.10	0.84	0.95	0.97	1.12
<b>MC-10</b>	1.30	1.18	1.17	0.98	1.28	1.14	1.15	1.04
<b>ACI-318</b>	1.51	1.42	1.40	1.22	1.53	1.37	1.38	1.30

Tabla IV-11. Deformación de pico. Ratio “deformación experimental/ deformación teórica”

$\epsilon_{cu}$	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H65-0	H65-20	H65-50	H65-100
<b>EC-2/EHE-08</b>	0.89	0.98	0.98	1.07	0.82	0.89	0.96	0.98
<b>MC-10</b>	1.06	0.99	0.99	0.93	1.18	1.10	1.01	1.02
<b>ACI-318</b>	0.97	0.87	0.87	0.80	1.04	0.97	0.89	0.88

Tabla IV-12. Deformación última. Ratio “deformación experimental/ deformación teórica”

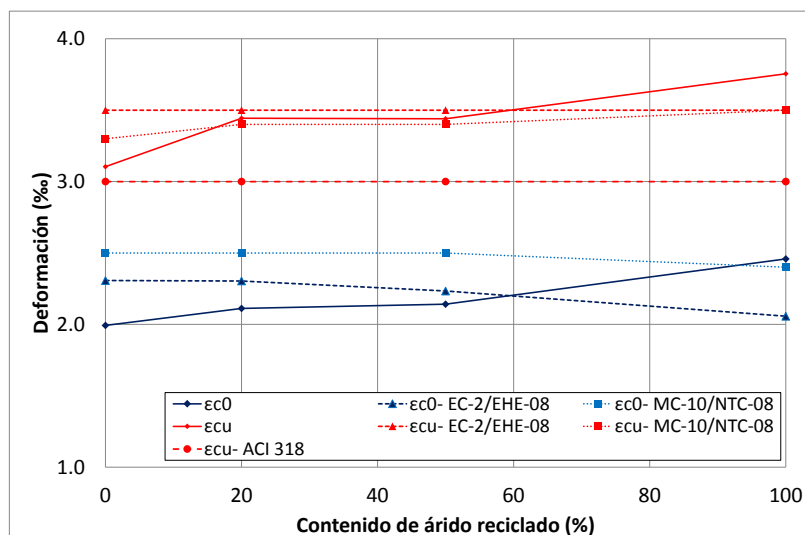


Figura IV-29. Deformación de pico y última de la Serie H50. Estimación normativa y resultados experimentales

<sup>3</sup> La normativa española EHE-08 adopta la fórmula propuesta en el EC-2.

<sup>4</sup> La normativa italiana NTC-08 adopta la fórmula propuesta en el MC-10.



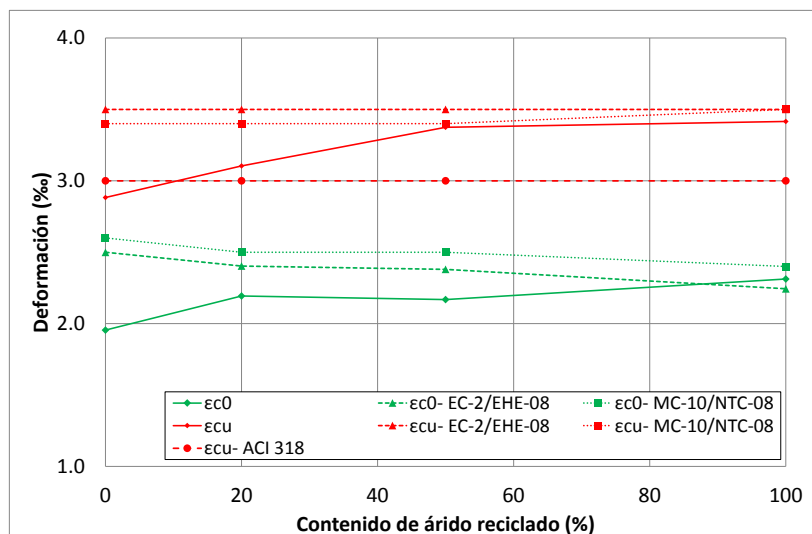


Figura IV-30. Deformación de pico y última de la Serie H65. Estimación normativa y resultados experimentales

En la Figura IV-31 se muestran los coeficientes obtenidos a partir del ajuste por regresión realizado con los resultados de esta campaña experimental.

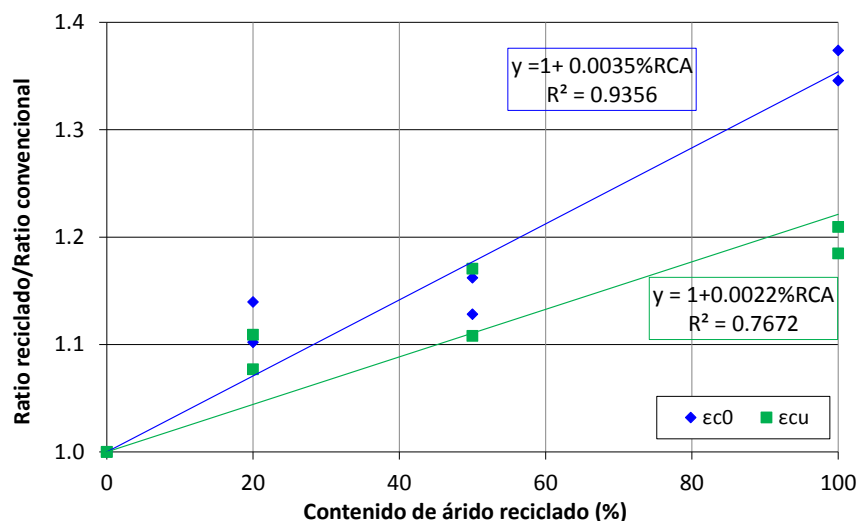


Figura IV-31. Ajuste del coeficiente corrector para la predicción de la deformación de pico y última

De esta forma se definen dos coeficientes correctores, que aplicados a la expresión teórica de la deformación de pico y última (IV-5) corrigen la curva tensión - deformación de los hormigones estudiados en función del contenido de árido reciclado con que se fabriquen ( $RCA = \% \text{ de árido reciclado empleado en tanto por uno}$ ), tal como se comprueba en la Figura IV-32.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{c0} &= \varepsilon_{c0,teórico} (1 + 0.35 \%RCA) \\ \varepsilon_{cu} &= \varepsilon_{cu,teórico} (1 + 0.22 \%RCA)\end{aligned}\tag{IV-5}$$

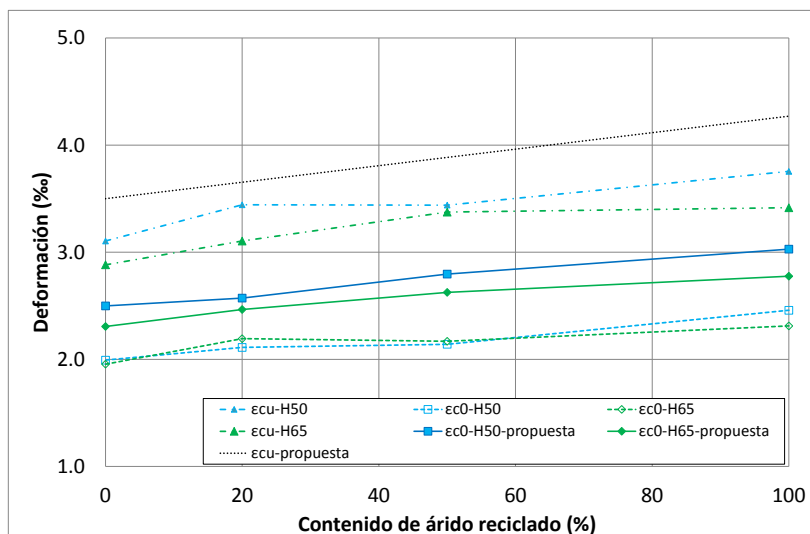


Figura IV-32. Deformación de pico y última. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales

## 4.6 Retracción

### 4.6.1 Resultados y análisis

La deformación de retracción ( $\epsilon_{sh}$ ) se obtuvo, experimentalmente, como el valor medio de las deformaciones registradas por una galga embebida en cada una de las dos probetas prismáticas fabricadas para cada tipo de hormigón. Mediante un sistema de adquisición de datos se realizó el registro continuo de dichas deformaciones, obteniéndose así los valores de la retracción libre en hormigones reciclados y de control (Figura IV-33).



Figura IV-33. Ensayo de retracción. Probetas y sistema de adquisición de datos

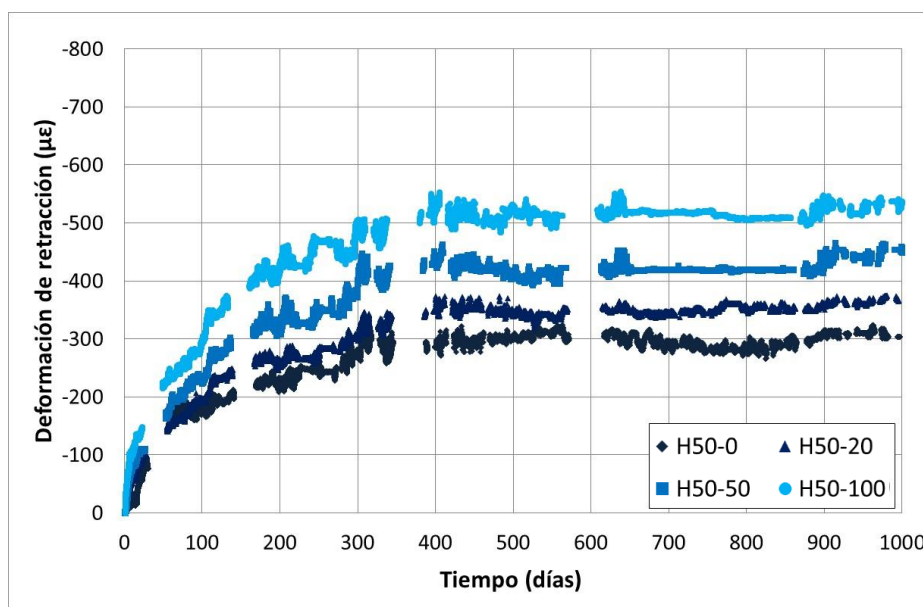
Tal como se detalla en el Capítulo II, la retracción, fenómeno complejo dependiente de diversos factores, se desarrolla a lo largo del tiempo en varias fases. Las primeras, denominadas retracción plástica, endógena (componente autógena) y térmica, se desarrollan aproximadamente durante las primeras 24 horas de vida del hormigón. Posteriormente, las fases conocidas como retracción por secado, endógena (componente de auto-deseccación), por carbonatación y térmica generan el grupo de deformaciones a largo plazo [HOLT05]. En este estudio se registran las deformaciones a partir de las 24 horas realizándose, por tanto, un análisis de la retracción a largo plazo. Aunque algunos autores consideran que, al encontrarse las probetas sometidas a condiciones termo-higrométricas ambientales, la componente principal de la retracción es la de secado, resulta complejo independizar unas de otras. Por ello se opta por

definir la deformación medida y analizada como retracción libre (free shrinkage) del hormigón [HOLT01; GHAL02], entendiéndose por tal la que suma las deformaciones que experimenta el hormigón, en ausencia de carga y sin restricciones, expuesto a condiciones ambientales de laboratorio. En adelante, de modo abreviado y para aligerar el texto, se empleará simplemente “retracción” para referirse a la retracción libre recién definida.

En la *Figura IV-34* y la *Figura IV-35* se observa, coincidiendo con otros autores [HASA81, DOMI09; CORI09], un incremento gradual de la retracción con el porcentaje de sustitución del árido grueso natural por reciclado, tanto para la serie H50 como para la serie H65. En efecto, a 1000 días de edad aumenta la deformación de retracción hasta un 77%, respecto a la del convencional, en los hormigones fabricados íntegramente con árido grueso reciclado. En los hormigones H65-20, H50-20, H65-50 y H50-50, para el mismo período, se registran incrementos del 9, 20, 33 y 48% respectivamente. Los incrementos de retracción, como puede verse, son ligeramente superiores en los hormigones reciclados de la serie H50 que en los de la serie H65, lo que evidencia que los hormigones reciclados de menores relaciones a/c acusan más la incorporación del árido reciclado.

La deformación de retracción de un hormigón se produce a lo largo de toda su vida útil, aunque ésta se desarrolla con mayor intensidad durante el primer año y llega a estabilizarse con el tiempo. En la *Figura IV-34* y la *Figura IV-35* se percibe el fuerte crecimiento de la retracción durante el primer año, que alcanza en todos los hormigones más del 80% de la deformación a 1000 días. A partir de este momento se produce un cambio de pendiente en la curva deformación/tiempo, pudiendo considerarse que se estabiliza la retracción a los 400 ó 500 días, permaneciendo después prácticamente constante.

En la *Tabla IV-13* se recogen las deformaciones de retracción medidas a 7, 28, 90, 180, 365 y 1000 días de edad para los diferentes hormigones estudiados. En ella se indica, además, el porcentaje de retracción alcanzada respecto de la registrada a los 1000 días de ensayo ( $\epsilon_{sh,1000}$  días).



*Figura IV-34. Evolución de la retracción libre en los hormigones. Serie H50*

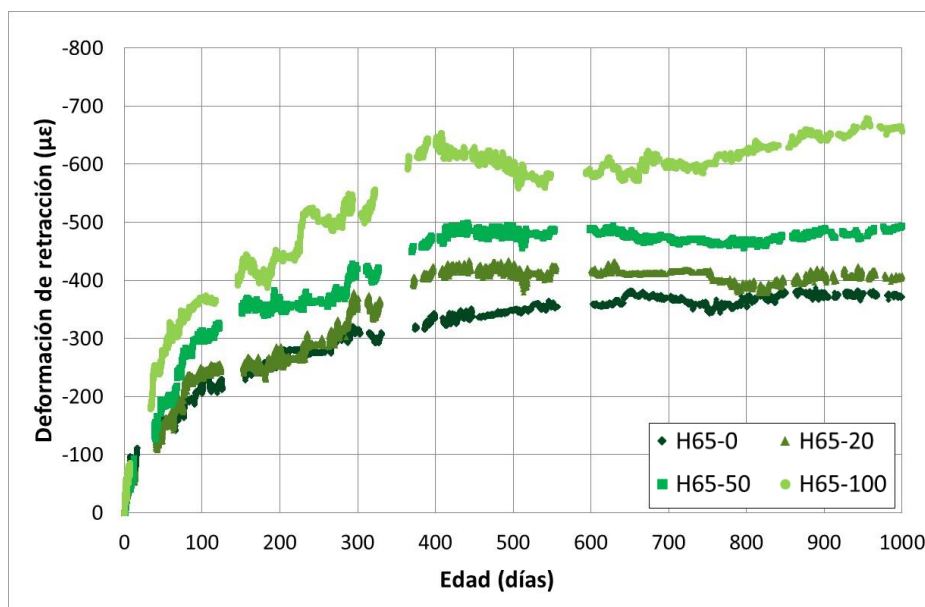


Figura IV-35. Evolución de la retracción libre en los hormigones. Serie H65

	$\epsilon_{sh,7 \text{ días}}$	$\epsilon_{sh,28 \text{ días}}$	$\epsilon_{sh,90 \text{ días}}$	$\epsilon_{sh,180 \text{ días}}$	$\epsilon_{sh,365 \text{ días}}$	$\epsilon_{sh,1000 \text{ días}}$
<b>H50-0</b>	-65 (21%)	-163 (53%)	-172 (57%)	-230 (76%)	-294 (97%)	-304
<b>H50-20</b>	-47 (13%)	-100 (27%)	-185 (51%)	-268 (73%)	-340 (93%)	-366
<b>H50-50</b>	-61 (14%)	-109 (24%)	-234 (52%)	-328 (73%)	-424 (95%)	-448
<b>H50-100</b>	-100 (19%)	-147 (27%)	-274 (51%)	-428 (80%)	-505 (94%)	-537
<b>H65-0</b>	-83 (22%)	-111 (30%)	-190 (51%)	-258 (70%)	-307 (83%)	-371
<b>H65-20</b>	-44 (11%)	-71 (17%)	-231 (57%)	-245 (60%)	-364 (90%)	-406
<b>H65-50</b>	-52 (11%)	-86 (17%)	-294 (60%)	-350 (71%)	-420 (85%)	-493
<b>H65-100</b>	-72 (11%)	-83 (13%)	-357 (54%)	-402 (61%)	-597 (91%)	-656

Tabla IV-13. Retracción a diferentes edades, 7, 28, 90, 180, 365 y 1000 días

Se obtienen diferencias de comportamiento en el tiempo entre los hormigones reciclados y convencionales. Se perciben con claridad a los 7 días, edad a la que los hormigones convencionales han desarrollado un 21 – 22% de la retracción total, frente al menor 11 – 19% que alcanzan los reciclados de ambas series. A 28 días se acentúan estas diferencias, ya que sobre los convencionales se mide entre un 30 y un 53% de la retracción total, limitada al 13 – 17% de la serie H65 y al 24 – 27% de la H50. Sin embargo, a partir de los 90 días se acompasan los desarrollos de la retracción en ambas series y tipos de hormigones, mostrándose porcentajes respecto a la retracción a 1000 días muy similares en todos los casos (51 - 60% y 83 – 97% a 90 días y un año, respectivamente). En la *Figura IV-36* y en la *Figura IV-37* se muestra el porcentaje que, respecto de la retracción a 1000 días, se ha desarrollado a los 90 días.

Se constata, por tanto, un desarrollo más lento de la deformación de retracción en los hormigones fabricados con árido reciclado. La mayor relación a/c, unida a la pre-saturación del árido grueso reciclado, origina, posiblemente, un exceso de agua en los hormigones reciclados que podría retrasar el inicio de la retracción. Este efecto, consecuencia del uso del árido reciclado pre-saturado, ya ha sido constatado por otros autores [COR10] bajo la denominación de “curado interno” (internal curing).

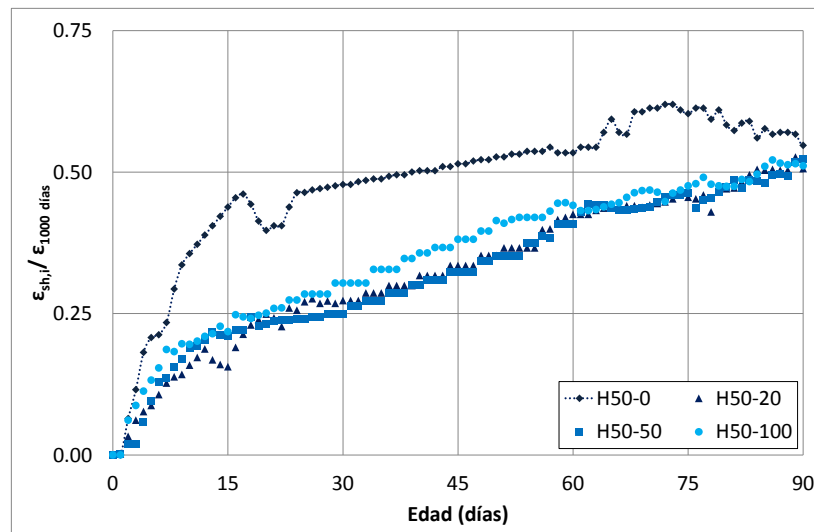


Figura IV-36. Desarrollo de la retracción en los primeros 90 días respecto a 1000 días. Serie H50

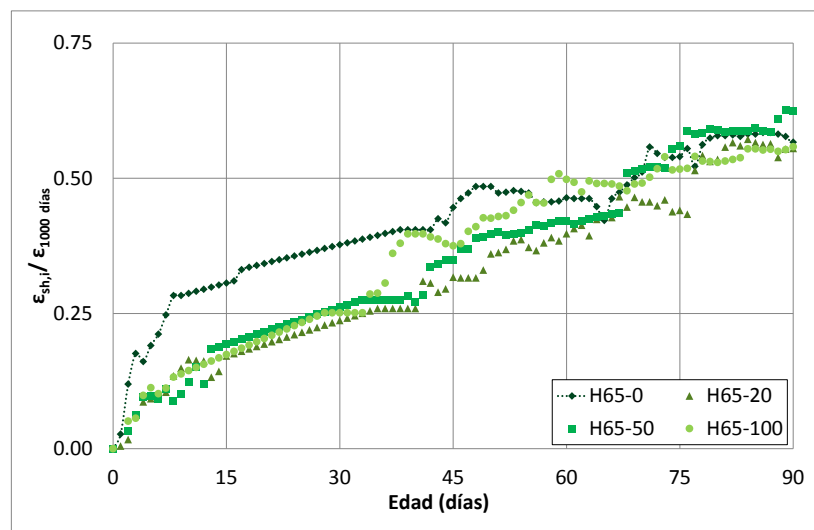


Figura IV-37. Desarrollo de la retracción en los primeros 90 días respecto a 1000 días. Serie H65

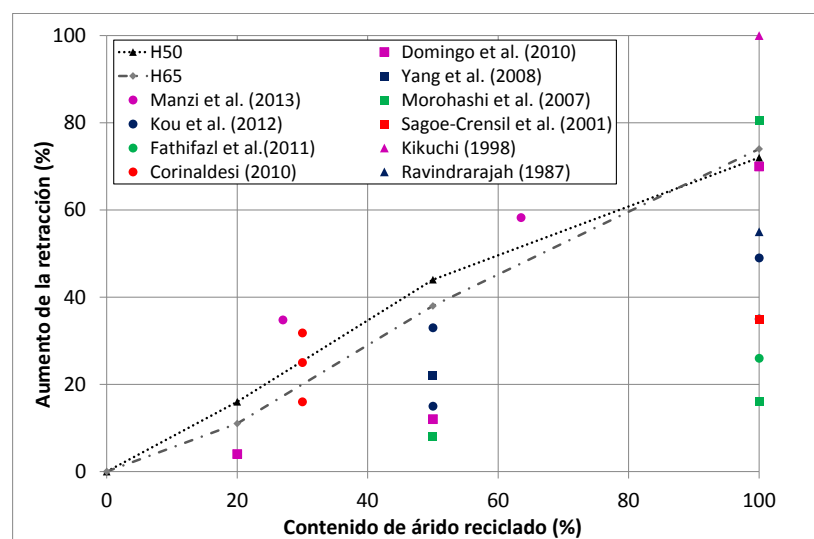


Figura IV-38. Incremento de la retracción vs. contenido de árido reciclado

Los resultados experimentales aportados por diferentes estudios e investigaciones revelan un amplio rango de variación en la retracción de aquellos hormigones fabricados íntegramente con árido reciclado, cuyo valor puede verse incrementado, respecto su convencional de control, desde tan sólo un 16% [MORO07] hasta un 70-80% [DOMI09; MORO07]. Estas discrepancias se mantienen cuando se sustituyen menores porcentajes (20-30%) de árido grueso natural por reciclado, registrándose desde leves variaciones del 4% [DOMI09; CORI10] a incrementos de hasta el 30% [CORI10]. En esta línea de análisis, la *Figura IV-38* recoge los resultados publicados por varios autores, y se comparan con los medidos en la presente campaña. Como puede observarse, éstos se sitúan dentro del rango de variación que acotan las .diversas investigaciones llevadas a cabo.

### 4.6.2 Estimación de la retracción

Al igual que en apartados anteriores, se pretende ajustar una expresión que, basada en alguna de las formulaciones recogidas en códigos o normas internacionales [EHE-08; NTC-08; EC-2; MC-10; ACI-318] para estimar la deformación de retracción de los hormigones convencionales, prediga con precisión similar la de los hormigones reciclados.

La mayoría de las expresiones normativas estiman la deformación de retracción de un hormigón a partir de la resistencia a compresión del mismo, la humedad relativa del ambiente, el tiempo de curado, el tipo de cemento empleado y, por supuesto, el instante de tiempo en que se evalúa. Se analiza así la evolución temporal estimada por cada expresión, introduciendo en ellas la resistencia a compresión medida en cada hormigón estudiado a fin de independizar el efecto de la incorporación del árido reciclado en la retracción (*Figura IV-39* y *Figura IV-40*).

Los resultados muestran que, en general, las normas estiman deformaciones de retracción mayores que las obtenidas experimentalmente.

En la *Tabla IV-14* se recogen, para las diferentes normas y códigos, las ratios “*retracción experimental/ retracción teórica*” obtenidas para cada tipo de hormigón a 1000 días. Se constata así, que las ratios obtenidas para los hormigones reciclados son mayores que las de sus correspondientes hormigones de control y aumentan al crecer el porcentaje de árido reciclado empleado. Así, con el fin de mantener las ratios “*retracción experimental/ retracción teórica*” similares a las obtenidas en los hormigones convencionales, se deberá introducir un coeficiente corrector para la estimación de la deformación de retracción en hormigones reciclados con distinto porcentaje de sustitución. Además, para tener en cuenta el desarrollo más lento de la deformación de retracción en los hormigones fabricados con árido pre-saturado este coeficiente adopta valores diferentes con la edad (IV-6).

NORMA	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H65-0	H65-20	H65-50	H65-100
<b>EHE-08/EC-2</b>	0.65	0.70	0.85	0.97	0.76	0.83	0.99	1.27
<b>MC-10</b>	0.62	0.67	0.80	0.93	0.72	0.79	0.94	1.19
<b>ACI-318</b>	0.45	0.54	0.70	0.84	0.62	0.64	0.72	0.90
<b>NTC-08</b>	0.67	0.72	0.88	1.03	0.79	0.85	1.03	1.30

Tabla IV-14. Retracción a 1000 días. Ratio “*retracción experimental/ retracción teórica*”

$$\varepsilon_{sh,reciclado} = \text{Coeficiente} \cdot \varepsilon_{sh,normativa} \quad (IV-6)$$

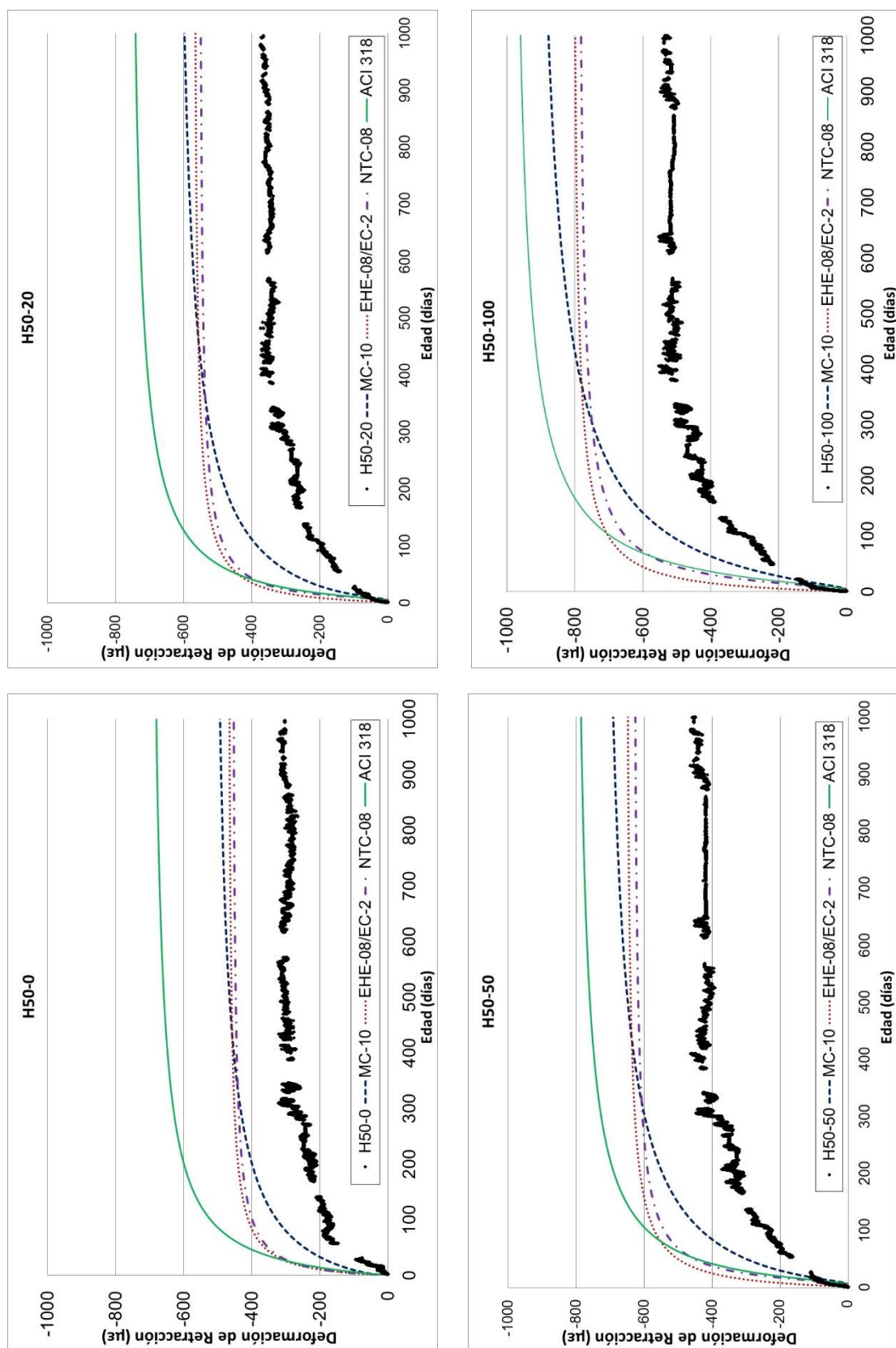


Figura IV-39. Evolución de la retracción. Predicción normativa y resultados experimentales. H50



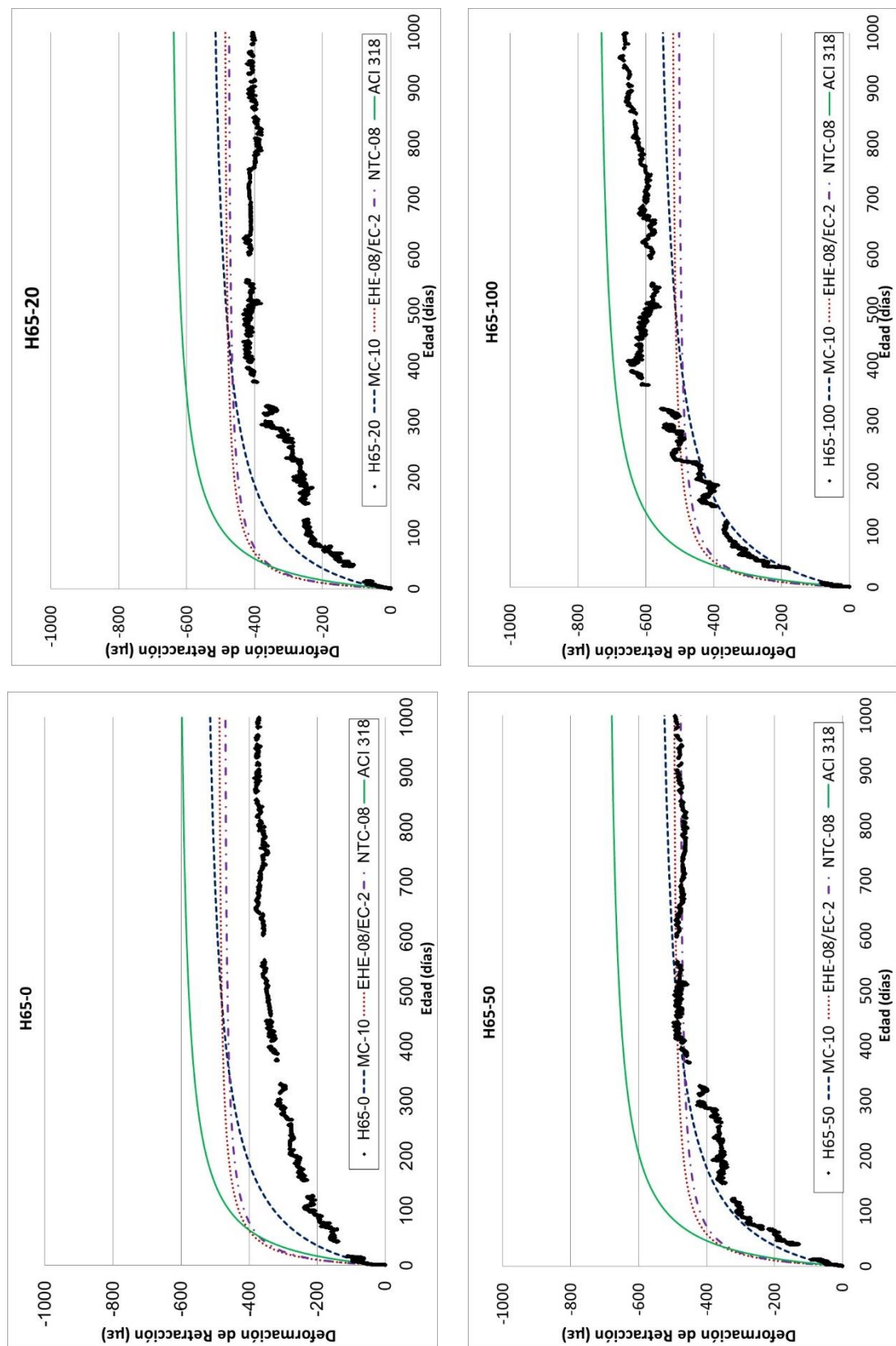


Figura IV-40. Evolución de la retracción. Predicción normativa y resultados experimentales. H65

Mediante regresión multivariable (*Figura IV-41*) se ha ajustado la expresión que, en función del porcentaje de árido reciclado empleado (%RCA, en tanto por uno) y la edad del hormigón (t, en días), permite calcular el coeficiente corrector que debe aplicarse en cada instante a la ecuación normativa de cálculo de la retracción para tener en cuenta el efecto del árido reciclado (IV-7). El error cuadrático medio obtenido en este ajuste es de 0.009.

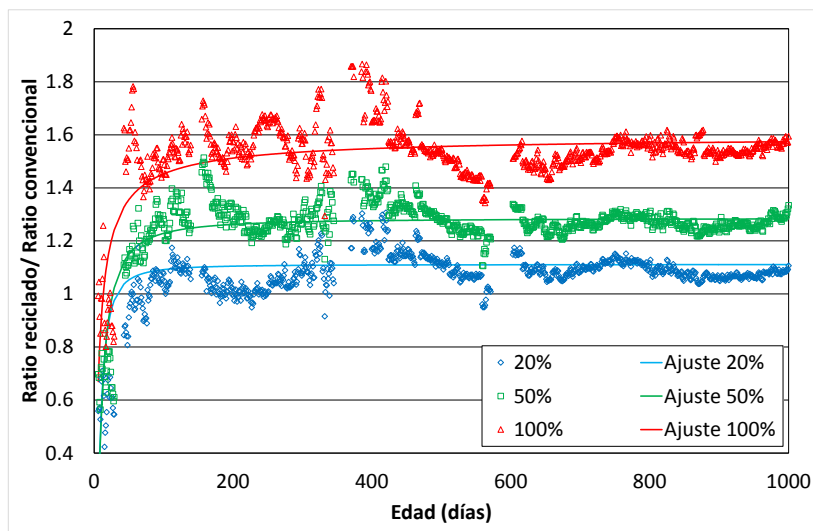


Figura IV-41. Ajuste del coeficiente corrector para la predicción de la deformación de retracción

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh,normativa} (1 + 0.44\%RCA) \left( e^{0.01\%RCA \left[ 1 - \left( \frac{90}{t} \right)^{(1.82 - 1.04\%RCA)} \right]} \right) \quad (IV-7)$$

Como puede observarse, el coeficiente corrector varía con la edad, especialmente durante los primeros 100 días, adaptándose al retraso en el desarrollo de la retracción en los hormigones fabricados con árido reciclado pre-saturado debido al efecto de “curado interno” (internal curing).

Utilizando las ecuaciones del Eurocódigo EC-2 corregidas por el factor deducido, se observa que la sobreestimación cometida en el hormigón de control se arrastra paralelamente a cada porcentaje de sustitución ensayado, de acuerdo al objetivo propuesto (*Figura IV-42* y *Figura IV-43*).

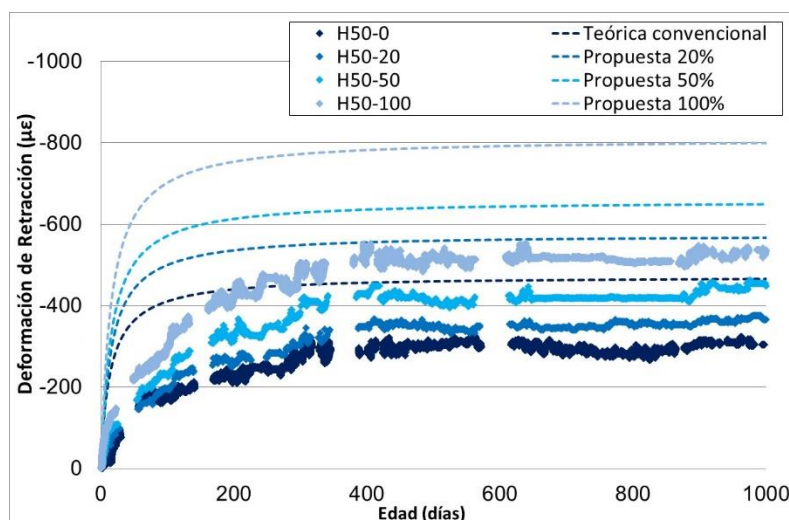


Figura IV-42. Retracción. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales. H50

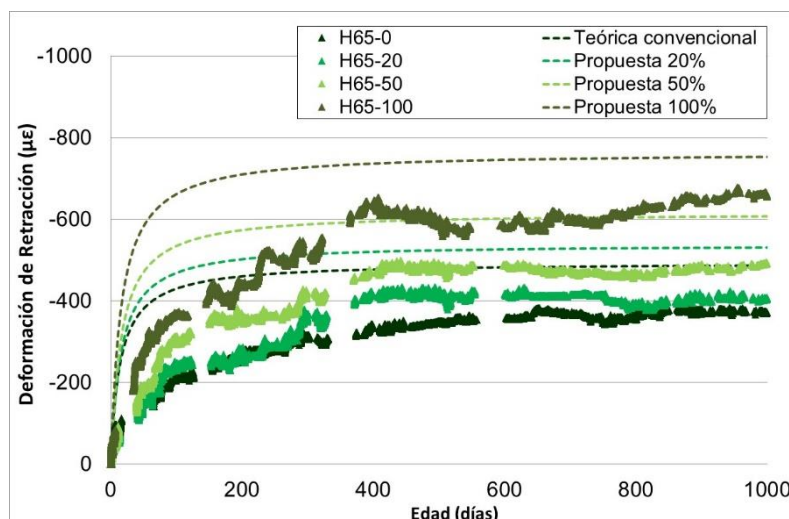


Figura IV-43. Retracción. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales. H65

En la Figura IV-44 se muestran las deformaciones estimadas a 1000 días de edad comparándolas con las experimentales, constatando de esta forma, que se obtiene el mismo grado de aproximación en el cálculo de la deformación de retracción en hormigones reciclados que en los convencionales.

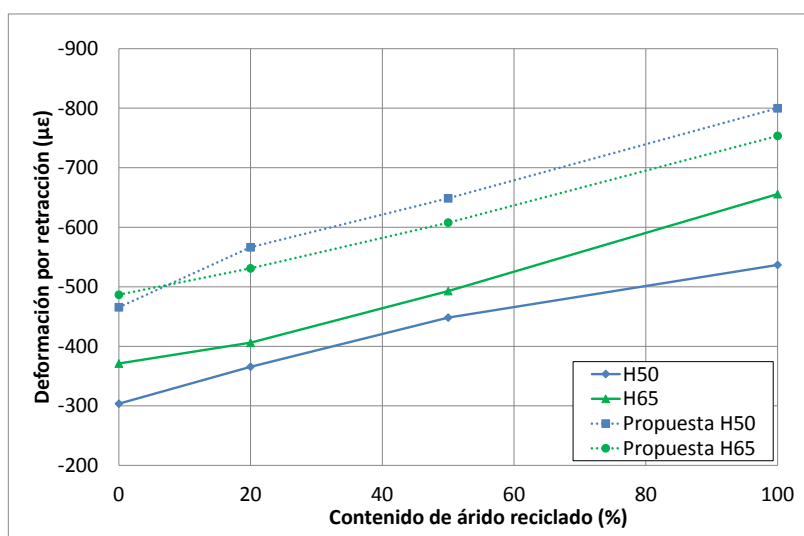


Figura IV-44. Retracción a 1000 días. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales

## 4.7 Fluencia

La fluencia ( $\epsilon_{cr}$ ) se define como la deformación diferida producida por el efecto de una compresión que se mantiene a lo largo del tiempo. Al igual que la retracción, sus efectos son determinantes en los ensayos sobre vigas bajo carga diferida, por lo que debe ser evaluada aisladamente sobre probeta para hacer posible los análisis posteriores. Por ello, de cada hormigón estudiado se decidió someter a carga constante dos probetas cilíndricas de 10x20 cm que se instrumentaron con galgas extensométricas. La carga constante se introdujo en el instante de puesta en carga de las vigas a flexión bajo carga sostenida ( $t_0 = 42$  días), de manera que los ensayos se desarrollaron simultáneamente en vigas y probetas, ambas en las mismas condiciones termohigrométricas del laboratorio. El sistema de carga empleado y el proceso de ensayo se detallan en el Capítulo III de este documento.

Durante las primeras 24 horas de ensayo se realizó un registro continuo de cargas y deformaciones, lo que permitió definir la rama de carga hasta alcanzar la tensión objetivo ( $\sigma_0$ , a partir de la deformación y el módulo  $E_c$  medidos) asociada al tiempo inicial ( $t_0$ ), para determinar la deformación elástica instantánea ( $\varepsilon_{c0}$ ) correspondiente a esa carga. A partir de las 24 primeras horas se registraron las deformaciones con frecuencia variable durante un periodo de 1000 días, lo que proporciona la deformación en el hormigón a lo largo del tiempo,  $\varepsilon_c(t, t_0)$ . Inicialmente las medidas se adquirieron diariamente, frecuencia que disminuyó gradualmente hasta la mensual que se adoptó a partir de los 6 meses de ensayo. La adquisición se extendía durante un período de 20 minutos.

El efecto conjunto de retracción y fluencia desarrollado bajo una carga de compresión sostenida en el tiempo no se corresponde exactamente con la suma de ambas deformaciones por separado, asunto que en la actualidad sigue siendo objeto de debate. Sin embargo, en este caso, se opta por aplicar la aditividad de deformaciones para un tiempo  $t$  (IV-8). De esta forma se considera la deformación en el hormigón,  $\varepsilon_c(t)$ , como la suma de las deformaciones independientes del estado tensional,  $\varepsilon^0(t)$ , y aquellas derivadas de la aplicación de una carga exterior, y dependientes por tanto del estado tensional,  $\varepsilon_{c\sigma}(t, t_0)$ . Las primeras corresponden a la suma de la componente de retracción  $\varepsilon_{sh}(t)$  y térmica  $\varepsilon_{T^a}(t)$ , mientras que las últimas se deben a la deformación instantánea y de fluencia,  $\varepsilon_0(t_0)$  y  $\varepsilon_{cr}(t, t_0)$ , respectivamente.

$$\begin{aligned}\varepsilon_c(t) &= \varepsilon_{c\sigma}(t, t_0) + \varepsilon^0(t) \\ &\quad - \varepsilon_{c\sigma}(t) = \varepsilon_0(t_0) + \varepsilon_{cr}(t, t_0) \\ &\quad - \varepsilon^0(t) = \varepsilon_{sh}(t, t_0) + \varepsilon_{T^a}(t, t_0) \\ \varepsilon_c(t) &= \varepsilon_0(t_0) + \varepsilon_{cr}(t, t_0) + \varepsilon_{sh}(t) + \varepsilon_{T^a}(t)\end{aligned}\tag{IV-8}$$

La fluencia se calcula restando a la deformación medida sobre las probetas cilíndricas de ensayo ( $\varepsilon_0$ ) la deformación instantánea ( $\varepsilon_0$ ) registrada el día de puesta en carga ( $t_0$ ) sobre esas mismas probetas, y las deformaciones independientes del estado tensional ( $\varepsilon^0$ ), determinadas sobre las probetas prismáticas de retracción analizadas en el apartado 4.6.

Al tratarse de hormigones expuestos a condiciones higrométricas ambientales durante el desarrollo de los ensayos, la fluencia medida corresponde a la suma de dos componentes [PICK42; BAZA94; NEVI95]: la fluencia básica, producida con independencia de las condiciones termo-higrométricas y la fluencia por secado (drying creep), componente que aparece cuando hay intercambio de humedad con el exterior.

A lo largo de este documento aparecen, además, referencias a la deformación diferida de los hormigones ( $\varepsilon_{dif}$ ), definida como suma de las deformaciones a largo plazo de un hormigón (retracción y fluencia).

#### 4.7.1 Estado tenso-deformacional del hormigón. Deformación total

De la *Figura IV-45* a la *Figura IV-50* se muestra la historia de tensiones y deformaciones totales que experimentaron los distintos hormigones de estudio durante toda la fase experimental. Estas deformaciones se calcularon considerando los valores de retracción medidos hasta la edad de carga ( $t_0=42$  días), los valores de deformación instantánea obtenidos durante el proceso de carga y las deformaciones registradas durante el periodo de carga sostenida ( $t-t_0=1000$  días), configurando, de esta forma, las curvas de deformación en los diferentes hormigones de estudio.

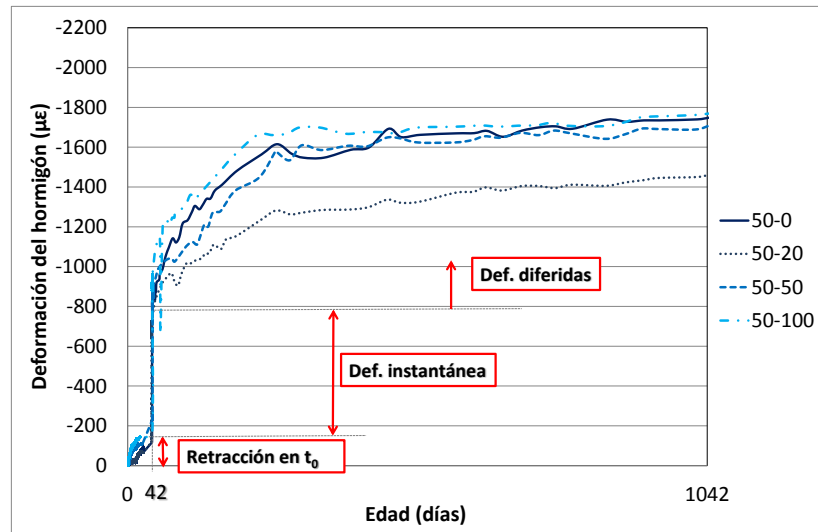


Figura IV-45. Deformación total - edad. Serie H50

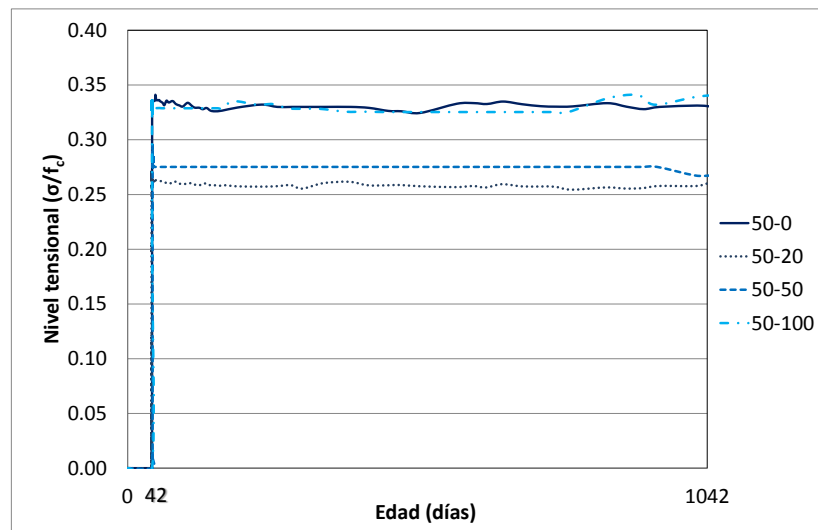


Figura IV-46. Nivel tensional - edad. Serie H50

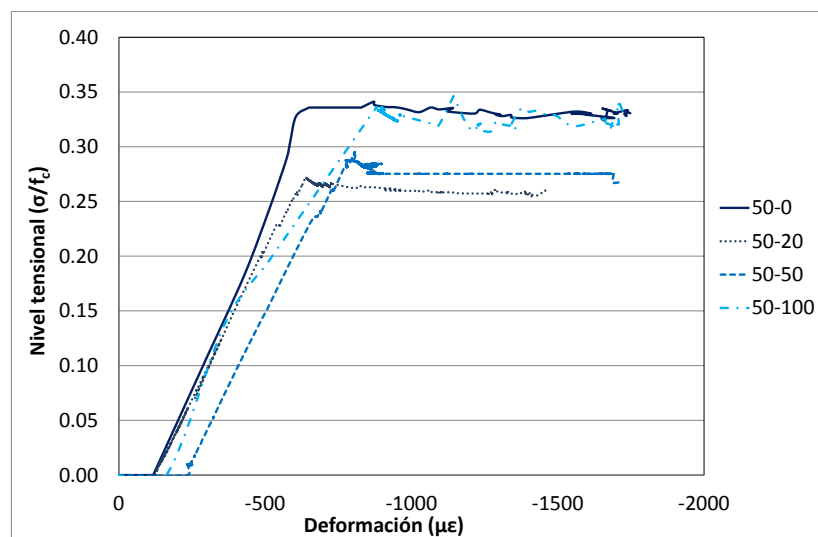


Figura IV-47. Nivel tensional - deformación. Serie H50

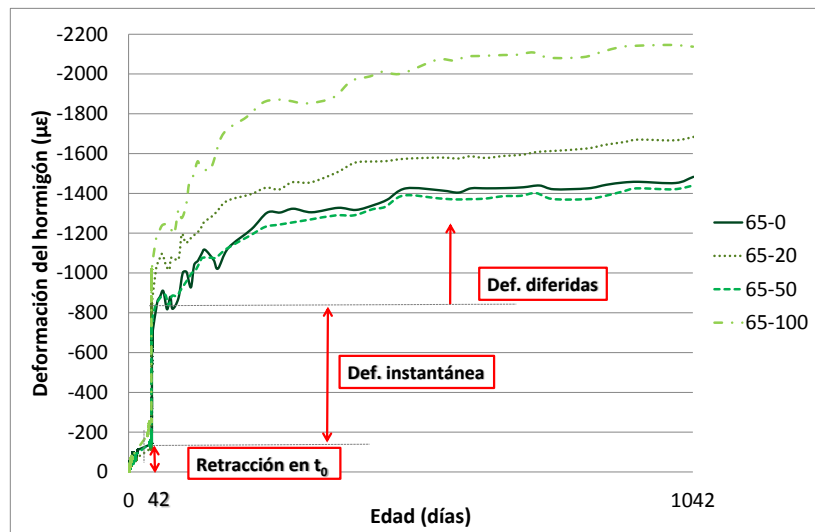


Figura IV-48. Deformación total- edad. Serie H65

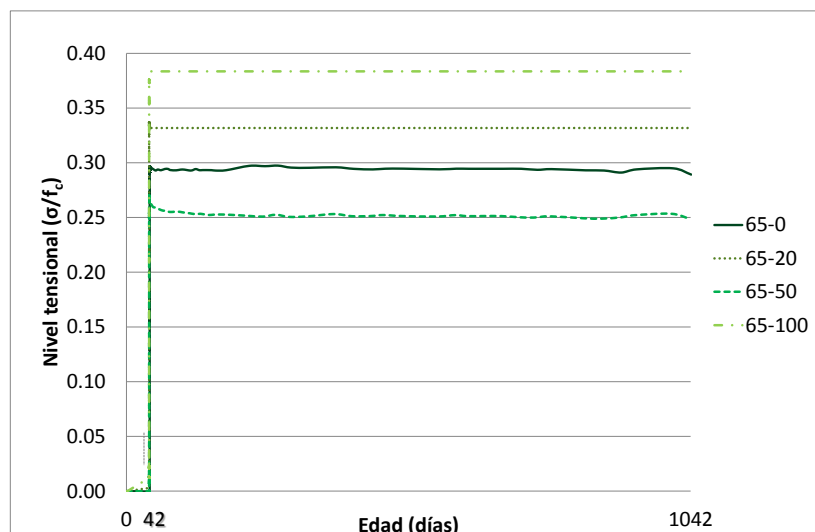


Figura IV-49. Nivel tensional - edad. Serie H65

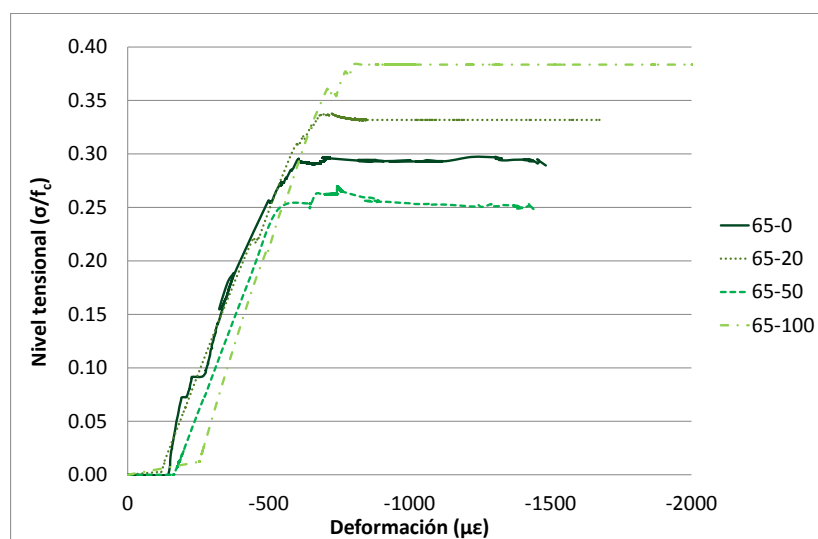


Figura IV-50. Nivel tensional - deformación. Serie H65

La *Tabla IV-15* resume los principales parámetros de ensayo (valores de tensión y nivel de carga) y los principales resultados obtenidos (deformación total, instantánea y de retracción tras 1000 días de carga). Con estos resultados se determinaron, finalmente, la deformación de fluencia y el coeficiente de fluencia, cuyo cálculo se desarrollará en los siguientes apartados.

	$\epsilon_c$ (1000 días) ( $\mu\epsilon$ )	$\epsilon_{co}$ ( $\mu\epsilon$ )	$\epsilon_{sh}$ ( $\mu\epsilon$ )	$\epsilon_{cr}$ ( $\mu\epsilon$ )	$\Phi$ (42,1042)	$\sigma_0$ (MPa)	$\sigma/f_c$ (%)
<b>H50-0</b>	-1630.98	-665.02	-201	-764.70	1.15	22.42	34%
<b>H50-20</b>	-1338.26	-502.54	-256	-579.32	1.15	15.60	26%
<b>H50-50</b>	-1488.92	-538.40	-351	-599.73	1.11	14.60	28%
<b>H50-100</b>	-1606.63	-532.13	-292	-782.39	1.47	15.22	34%
<b>H65-0</b>	-1305.32	-489.79	-230	-590.94	1.22	14.80	29%
<b>H65-20</b>	-1564.64	-544.00	-280	-740.22	1.36	15.75	33%
<b>H65-50</b>	-1230.78	-350.91	-357	-523.18	1.49	11.00	26%
<b>H65-100</b>	-1876.14	-530.27	-419	-927.34	1.75	12.63	39%

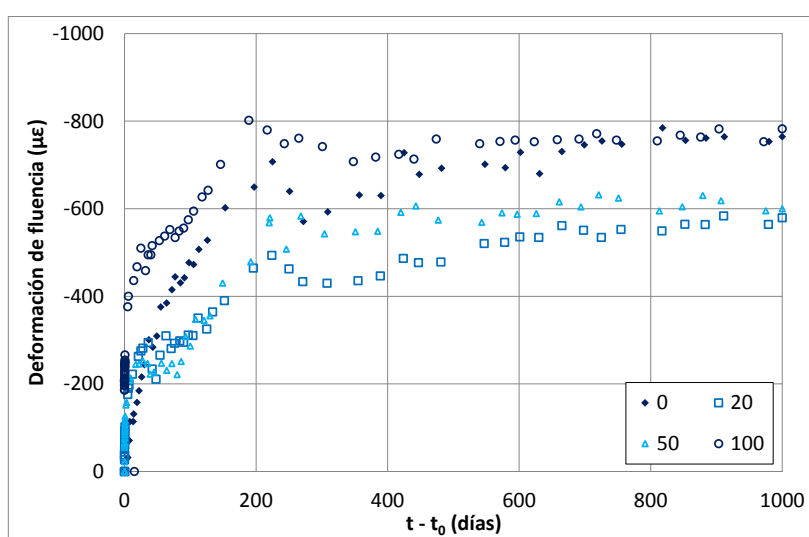
*Tabla IV-15. Estado tensional y deformacional en  $(t-t_0)=1000$  días*

## 4.7.2 Deformación de fluencia y fluencia unitaria

En este estudio se ha optado, tal y como ya se ha mencionado, por aplicar el principio de aditividad de deformaciones, que permite calcular la fluencia (*Figura IV-51 y Figura IV-52*) como la diferencia entre la deformación diferida y la de retracción, determinada previamente sobre probetas prismáticas almacenadas en las mismas condiciones termo-higrométricas que las de fluencia [MASA06; DOMI09].

De los resultados obtenidos se constata que en los 200 primeros días de carga se desarrollan la mayor parte de las deformaciones, tanto en hormigones reciclados como convencionales, tendiendo a estabilizarse a partir de ese momento.

El diferente nivel de carga aplicado a cada hormigón y las variaciones en sus resistencias a compresión dificultan la comparación de la fluencia desarrollada en los hormigones estudiados, impidiendo determinar si las diferencias que se observan se deben al contenido de árido reciclado con que fueron fabricados o a alguno de esos otros condicionantes.



*Figura IV-51. Evolución de la deformación de fluencia. Serie H50*



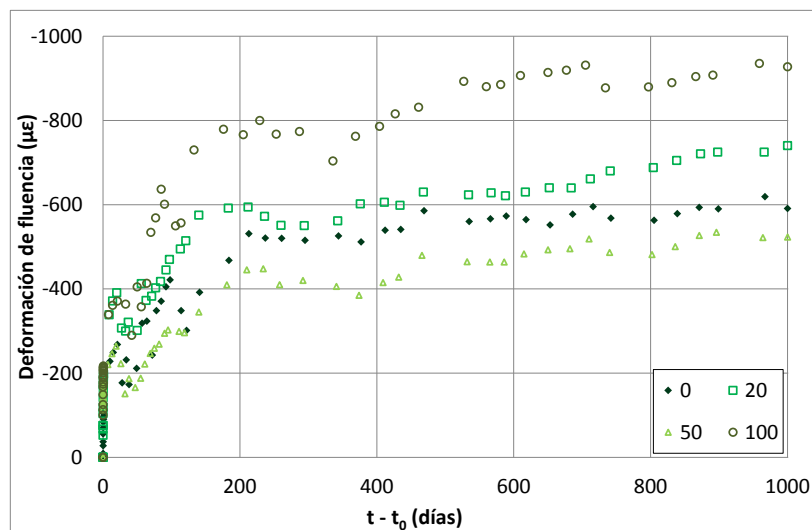


Figura IV-52. Evolución de la deformación de fluencia. Serie H65

En este estudio los niveles de carga alcanzados durante el ensayo variaron entre el 26% y el 39% de la resistencia del hormigón (*Tabla IV-15*). La normalización de las medidas a través del concepto de fluencia unitaria ( $\epsilon_{cr,s}$ ) resulta imprescindible como parámetro de comparación. Esta se obtiene como la relación entre la deformación de fluencia ( $\epsilon_{cr}$ ) y la tensión ( $\sigma_c$ ) a la que se encuentra sometido el hormigón (*IV-9*). Con ella se normaliza la deformación de fluencia, independizándose los resultados obtenidos en los diferentes hormigones de estudio del nivel tensional alcanzado durante el proceso de carga. El empleo de este recurso sólo es posible siempre que las tensiones mantengan las deformaciones en el rango de la fluencia lineal, es decir, la que se produce a tensiones inferiores al 45% de la resistencia a compresión del hormigón [*MC-10, EHE-08*].

$$\epsilon_{cr,s} = \frac{\epsilon_{cr}}{\sigma_c} \quad (IV-9)$$

Los valores de la fluencia unitaria revelan una significativa influencia del contenido de árido reciclado sobre el comportamiento de los hormigones estudiados (*Figura IV-53 y Figura IV-54*). Respecto a los hormigones patrón, a 1000 días se constatan incrementos en la fluencia unitaria del 9-18% cuando los porcentajes de sustitución son del 20%, del 20-26% con sustituciones del 50% y del 51-84% si todo el árido grueso se reemplaza por reciclado. Además, se observa con claridad la mayor fluencia de los hormigones reciclados si crece la relación a/c.

Varios autores han estudiado la fluencia en hormigones reciclados. Sus resultados, comparados con los de esta campaña, permiten constatar una elevada dispersión en las deformaciones de fluencia y fluencia unitaria determinadas en las diversas investigaciones, detectándose un amplio rango de variación en los porcentajes de incremento de la fluencia de los hormigones reciclados respecto de sus hormigones de control (*Figura IV-55*).

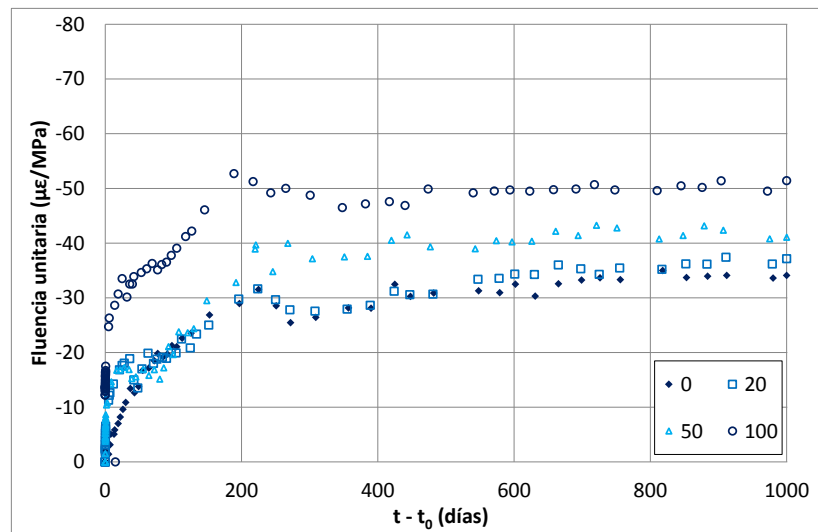


Figura IV-53. Fluencia unitaria. Serie H50

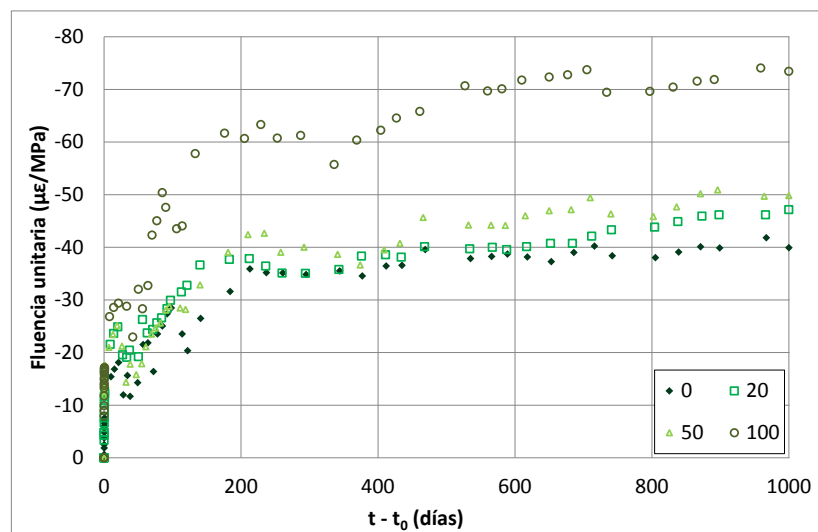


Figura IV-54. Fluencia unitaria. Serie H65

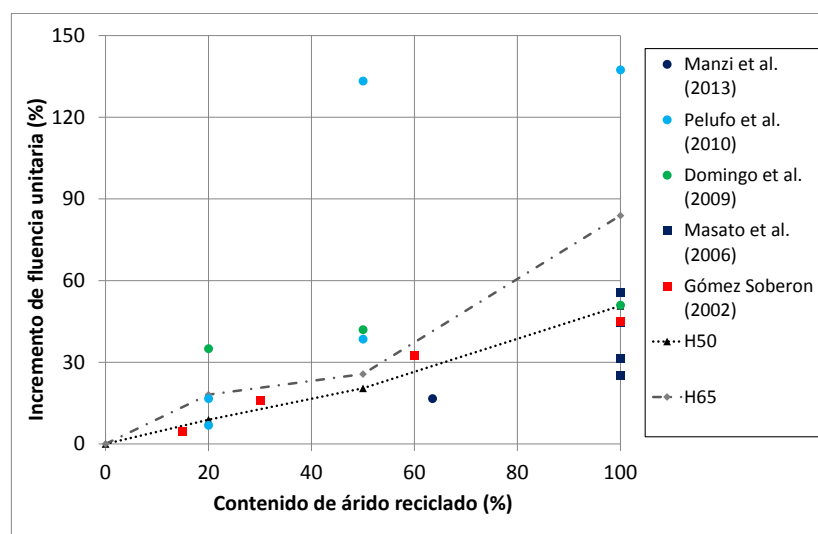


Figura IV-55. Incremento de la fluencia unitaria vs. Contenido de árido reciclado

### 4.7.3 Coeficiente de fluencia

El coeficiente de fluencia constituye un parámetro muy útil en el diseño estructural y el análisis del comportamiento diferido del hormigón bajo carga sostenida. Este coeficiente, relacionado directamente con la función de fluencia, se obtiene a partir de la deformación instantánea ( $\varepsilon_0$ ) producida al aplicar la carga y la deformación de fluencia ( $\varepsilon_{cr}$ ) que experimenta el hormigón en cada instante de tiempo y constituye, por tanto, una relación entre ambas (IV-10).

$$\varepsilon_c(t) = \sigma_c \left[ \frac{1}{E_c} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{c,28}} \right] + \varepsilon_{sh}$$

$$\varepsilon_0 = \sigma_c / E_c$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 (1 + \varphi(t, t_0)) + \varepsilon_{sh} = \varepsilon_0 + \varepsilon_0 \varphi(t, t_0) + \varepsilon_{sh}$$

$$\varphi(t, t_0)_{experimental} = \varepsilon_{cr} / \varepsilon_0$$
(IV-10)

La tendencia que muestran las curvas coeficiente de fluencia – tiempo (Figura IV-56 y Figura IV-57) es similar a la de las de fluencia unitaria del hormigón. Los coeficientes de fluencia de los hormigones reciclados indican una menor influencia del árido reciclado, con valores similares a los convencionales para los hormigones con el 20% y 50% de sustitución del árido grueso natural por reciclado. Sin embargo, aquellos fabricados íntegramente con árido reciclado presentan coeficientes de fluencia superiores, 11% y 45% para los hormigones H50-100 y H65-100, respectivamente. Los mayores coeficientes de fluencia en los hormigones reciclados respecto a los convencionales se atribuyen al menor módulo de deformación que presentan y, por tanto, a su mayor deformabilidad.

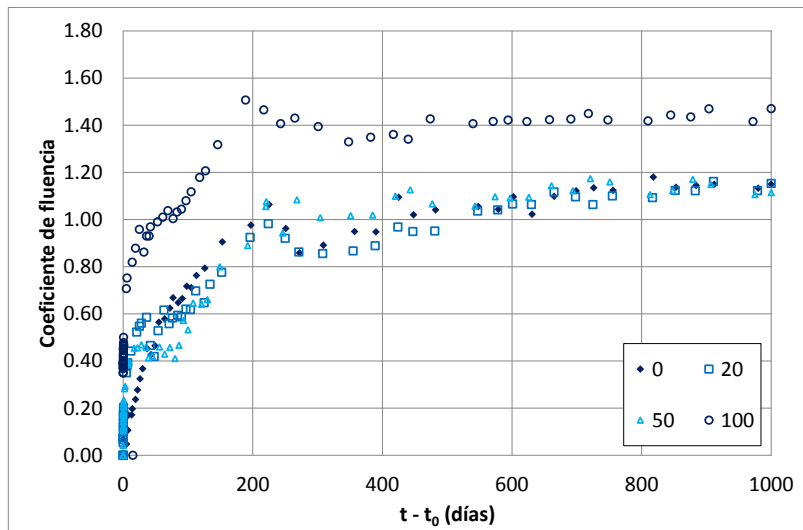


Figura IV-56. Coeficiente de fluencia. H50

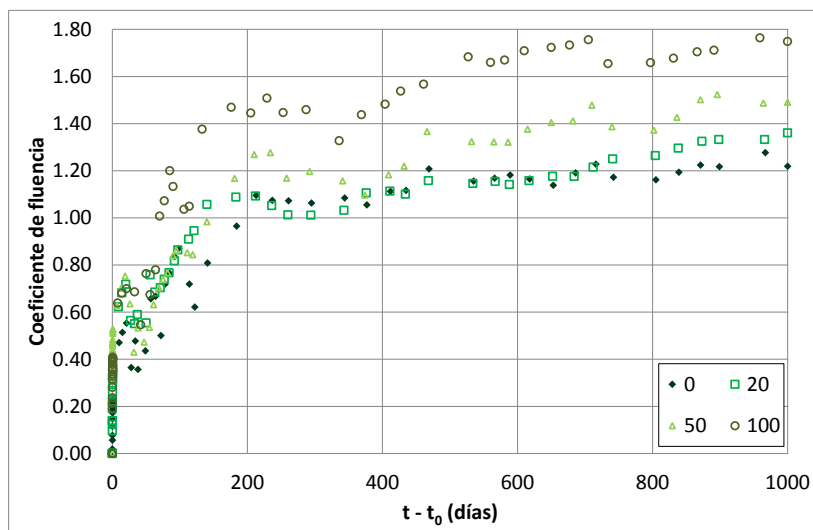


Figura IV-57. Coeficiente de fluencia. H65

#### 4.7.4 Estimación del coeficiente de fluencia en hormigones reciclados

Los modelos empíricos propuestos por los diferentes códigos y normas vigentes permiten determinar las deformaciones de fluencia a partir del coeficiente de fluencia ( $\varphi(t, t_0)$ ) de un hormigón. Este parámetro depende directamente de cuatro factores fundamentales: la humedad ambiente a la que se encuentran expuestos los hormigones (%HR), la resistencia media a compresión ( $f_c$ ), la edad de puesta en carga de los mismos ( $t_0$ ) y las dimensiones de la pieza ( $A_c$ ,  $u$ ) [MC-10; EC-2; EHE-08; NTC-08]. En algún caso se incluye la cantidad de finos y cemento empleada o la consistencia del hormigón [ACI-318].

Además, el ensayo normalizado de fluencia se inicia a 28 días, por lo que las expresiones propuestas por los diferentes códigos y normativas establecen coeficientes de fluencia teóricos para esta edad de carga. Para corregir el efecto de una edad de puesta en carga diferente se utiliza el factor  $\beta_E$ . Este tiene en cuenta los módulos de deformación longitudinal del hormigón a 28 y a 42 días, edad real de puesta en carga de los hormigones en esta campaña experimental (IV-11).

$$\begin{aligned}\varepsilon(t) &= \sigma_{C,42} \left[ \frac{1}{E_{C,42}} + \frac{\varphi(t,42)}{E_{C,28}} \right] \\ \varepsilon_o(42) &= \sigma_{C,42} / E_{C,42} \\ \varepsilon(t) &= \varepsilon_o(42) \left( 1 + \frac{E_{C,42}}{E_{C,28}} \varphi(t,42) \right) \\ \beta_E &= E_{C,42} / E_{C,28} \\ \varphi(t,42)_{\text{normativa}} &= \varphi(t,28)_{\text{normativas}} \beta_E\end{aligned}\tag{IV-11}$$

Con el fin de comprobar la necesidad de fijar, en su caso, un coeficiente corrector para el cálculo teórico de la fluencia se ha realizado, como en los apartados anteriores, un estudio de los valores del coeficiente de fluencia experimentales y teóricos, evaluando el grado de aproximación en hormigones reciclados y comparándolo con el obtenido para los convencionales.

Este análisis se ha realizado con las expresiones recogidas en las diferentes normativas a partir de la resistencia a compresión experimental de cada hormigón, y estimando las demás propiedades mecánicas mediante las correcciones propuestas en este capítulo para los hormigones reciclados. Como resultado de este análisis se obtuvieron las curvas teóricas de los coeficientes de fluencia para todo el periodo de ensayo ( $t-t_0$ ), siendo  $t_0 = 42$  días y  $t$  los diferentes instantes de medida hasta alcanzar los 1000 días de carga, *Figura IV-58* y *Figura IV-59*.

En la *Tabla IV-16* se resumen las ratios “coeficiente  $\varphi$  experimental/ coeficiente  $\varphi$  teórico” obtenidas a partir de los coeficientes de fluencia a 1000 días según las diferentes propuestas normativas. A edades por encima de 90 días (58 días de carga) el hecho de emplear la resistencia a compresión experimental y el módulo de deformación teórico corregido según el porcentaje de árido reciclado presente en cada hormigón, introduce, implícitamente, el efecto del árido reciclado. De esta forma se puede observar que los valores de las ratios obtenidos a 1000 días se mantienen prácticamente constantes con independencia del porcentaje de sustitución empleado.

Norma	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H65-0	H65-20	H65-50	H65-100
<b>EHE-08/EC-2</b>	0.96	0.85	0.81	0.81	0.80	0.90	0.92	0.85
<b>MC-10</b>	1.06	0.93	0.89	0.96	0.88	0.99	0.99	0.88
<b>ACI-318</b>	0.68	0.64	0.65	0.79	0.96	0.97	0.97	1.00
<b>NTC-08</b>	1.12	1.01	0.98	0.93	0.96	1.03	1.12	0.93

*Tabla IV-16. Coeficiente de fluencia a 1000 días. Ratios “coeficiente  $\varphi$  experimental/ coeficiente  $\varphi$  teórico”*

Sin embargo, de nuevo el efecto del “Internal Curing” hace que el coeficiente de fluencia a edades tempranas presente una evolución diferente en hormigones reciclados que en los convencionales. En este caso, este efecto retrasa el desarrollo de las resistencias, haciendo que los hormigones reciclados a edades tempranas presenten una mayor deformabilidad.

Así, de nuevo, para conseguir el mismo nivel de precisión entre los hormigones convencionales y los reciclados manteniendo las ratios “coeficiente  $\varphi$  experimental/ coeficiente  $\varphi$  teórico” de los hormigones de estudio deberá ajustarse un coeficiente corrector para la estimación de la deformación de fluencia que, especialmente, tenga en cuenta el mayor desarrollo de la misma en estos hormigones a edades inferiores a 90 días.

Se realiza el ajuste del coeficiente corrector mediante regresión multivariable (*Figura IV-60*), obteniéndose la expresión (IV-12) con un error cuadrático medio de 0.05. Como era previsible, esta expresión no depende del porcentaje de árido reciclado empleado, resultando función, únicamente, de la edad ( $t$  en días). Este coeficiente debe aplicarse en cada instante a la ecuación normativa de cálculo de la fluencia para tener en cuenta el retraso en el desarrollo de las resistencias de los hormigones con árido reciclado.

$$\varphi = \varphi_{\text{normativa}} \left( e^{0.05 \left[ \left( \frac{90-t_0}{t-t_0} \right) - 1 \right]} \right) \quad (\text{IV-12})$$

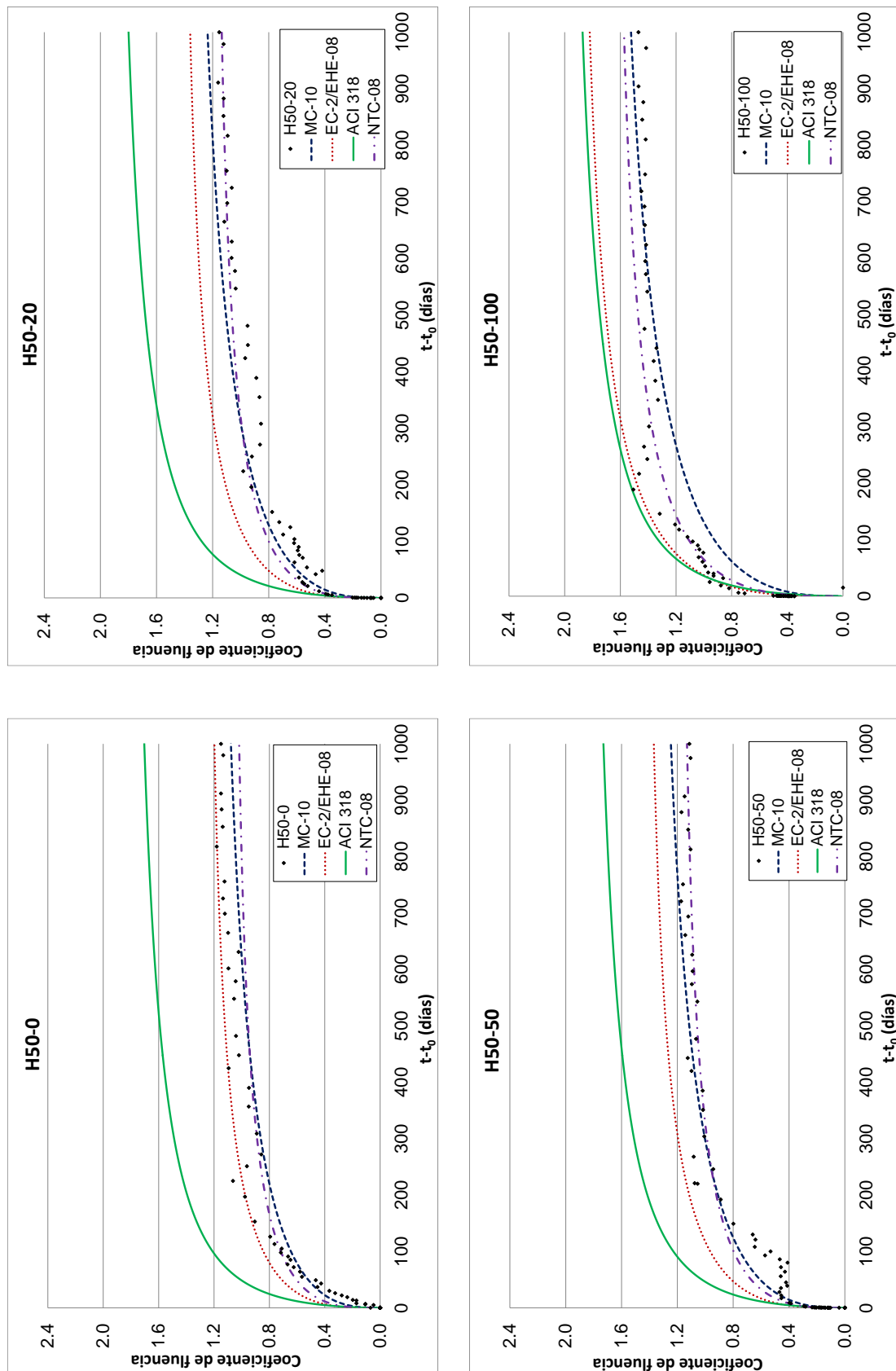


Figura IV-58. Coeficiente de fluencia de la Serie H50. Predicción normativa y resultados experimentales

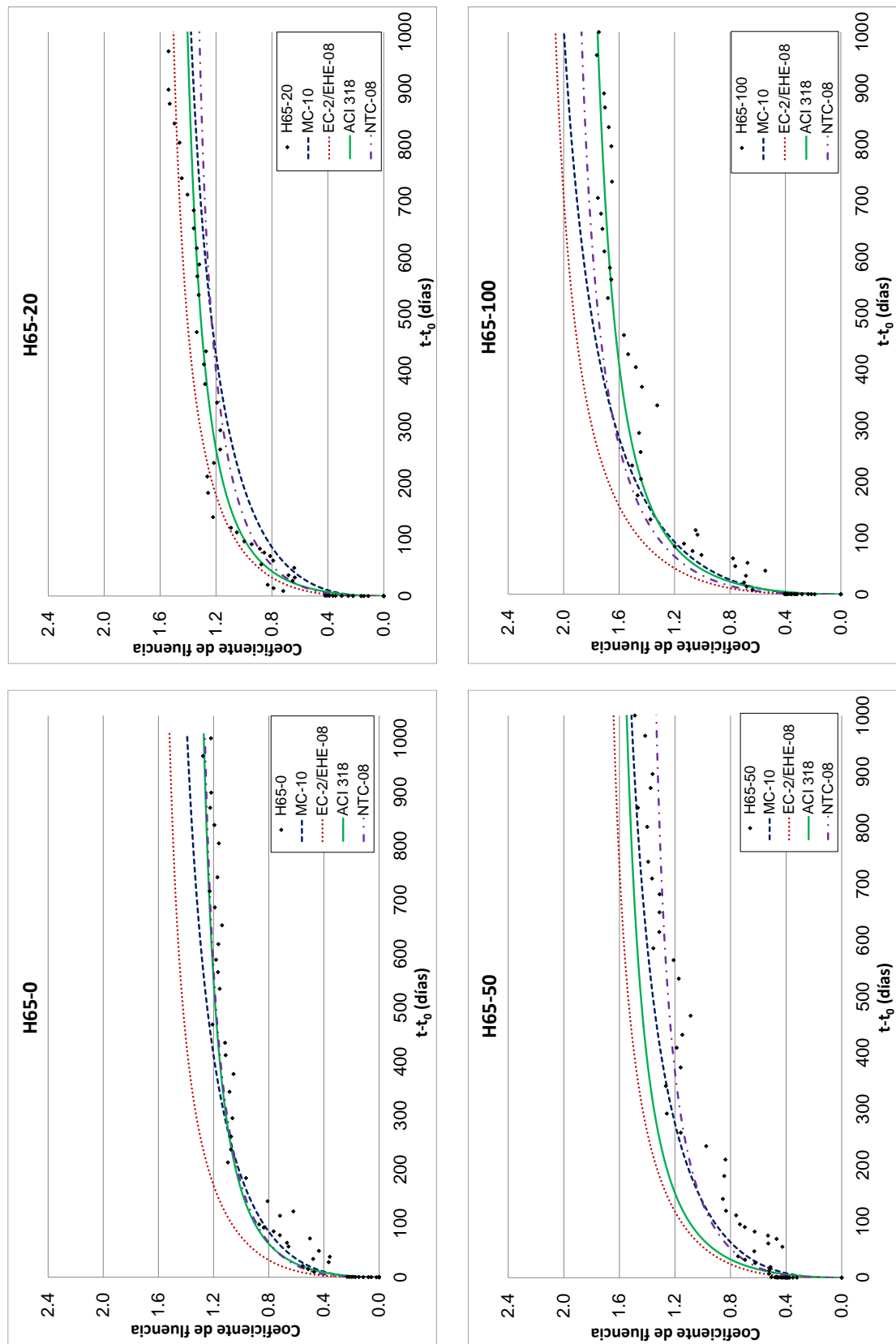


Figura IV-59. Coeficiente de fluencia de la Serie H65. Predicción normativa y resultados experimentales



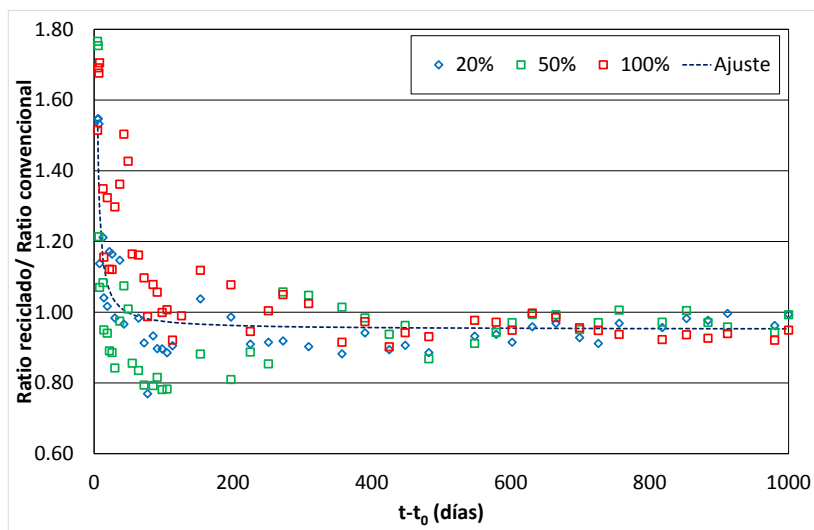


Figura IV-60. Ajuste del coeficiente corrector para la predicción del coeficiente de fluencia

Las curvas de evolución del coeficiente de fluencia obtenidas con las ecuaciones del Eurocódigo EC-2 corregidas por el factor deducido y los valores experimentales del mismo se muestran en la Figura IV-61 y la Figura IV-62. De esta forma, se constata que el cálculo de los coeficientes de fluencia obtiene el mismo grado de aproximación en hormigones reciclados que en los convencionales, cuestión que se aprecia claramente en la Figura IV-63, donde se muestran los resultados obtenidos a 1000 días.

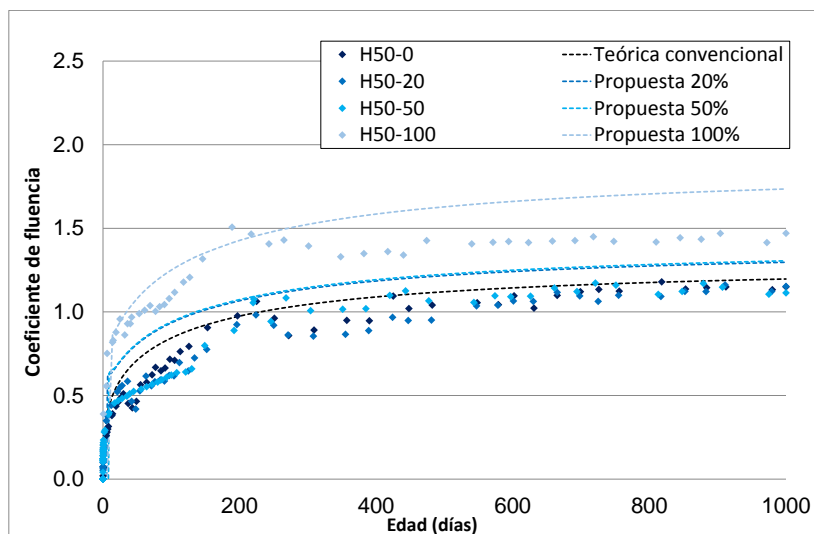


Figura IV-61. Coeficiente de fluencia. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales.  
H50

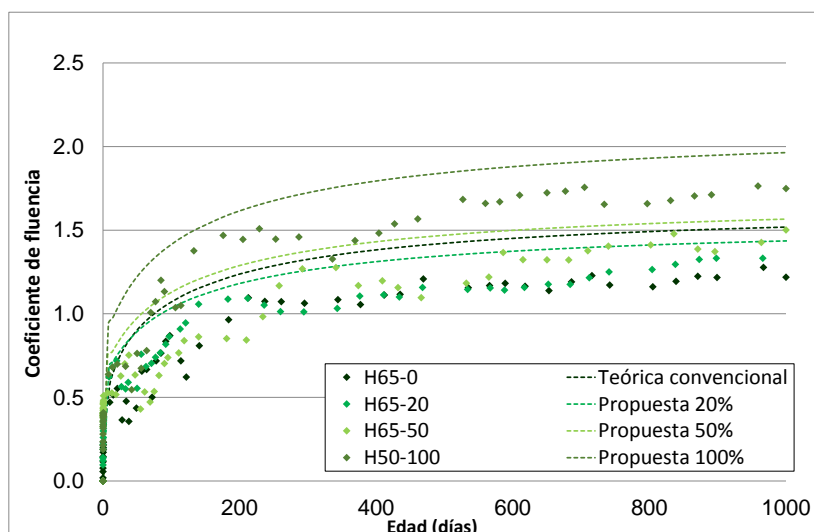


Figura IV-62. Coeficiente de fluencia. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales. H65

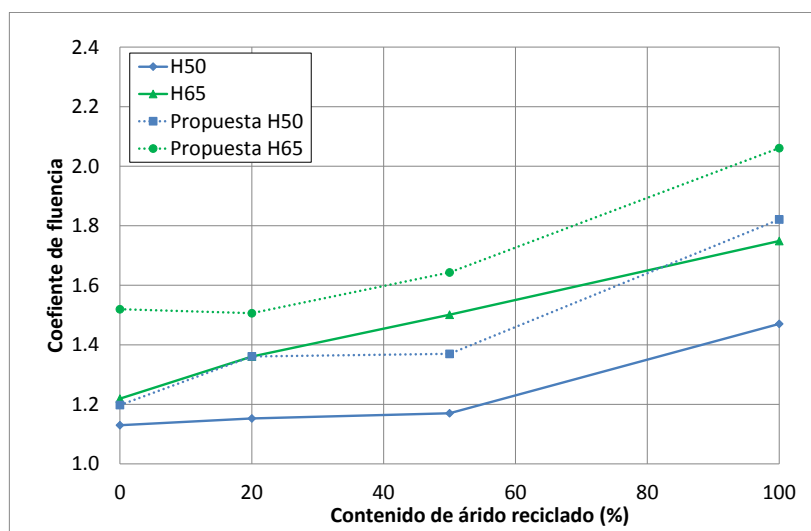


Figura IV-63. Coeficiente de fluencia a 1000 días. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales

## 5 CONSIDERACIONES FINALES SOBRE LOS HORMIGONES ESTUDIADOS

### 5.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas del hormigón (consistencia, densidad y absorción) se ven afectadas por el porcentaje de sustitución del árido grueso natural por reciclado en tanto que la densidad disminuye y la absorción crece.

Para conseguir una consistencia adecuada sería necesario un control riguroso en el proceso de amasado, a fin de controlar la relación a/c efectiva.

## 5.2 Resistencias mecánicas y módulo de deformación

Se constata la influencia de la absorción y la cantidad de árido reciclado en las propiedades mecánicas (resistencias y módulo de deformación) de los hormigones reciclados. En concordancia con los resultados de otros autores, las resistencias a compresión, a tracción y el módulo de deformación disminuyen al crecer el porcentaje de árido empleado.

A 28 días, la resistencia a compresión de los hormigones fabricados íntegramente con árido grueso reciclado, H50-100 y H65-100, presenta reducciones del 28 y 31%, respectivamente.

En el caso de la resistencia a tracción, se obtuvieron mayores dispersiones, detectándose un descenso de la misma del 48% en el H50-100 y del 43% en el H65-100.

Cabe destacar, además, que los hormigones de la serie H50 acusan, en general, una influencia del árido reciclado ligeramente superior en las resistencias a compresión y tracción que los de la serie H65, de mayor relación a/c y, por tanto, menor resistencia.

Finalmente, el módulo de deformación experimentó caídas del 29 y 32% en los hormigones fabricados con el 100% de árido grueso reciclado de la serie H50 y H65, respectivamente.

Se han ajustado sendos factores para corregir las expresiones normativas que estiman la resistencia a tracción y el módulo de deformación, consiguiéndose de este modo que sus predicciones sobre los hormigones reciclados alcancen el mismo grado de aproximación que sobre los convencionales (mismas ratios "*propiedad experimental/ propiedad teórica*"). Los dos factores incluyen el porcentaje de árido reciclado empleado (%RCA, en tanto por uno) como única variable y permiten estimar valores teóricos de  $f_{ct}$  y  $E_c$  a partir de cualquier expresión normativa (Tabla IV-17).

Corrección propuesta	
<b>Resistencia a tracción</b>	$f_{ct} = f_{ct,normativa}(1 - 0.22\%RCA)$
<b>Módulo de deformación</b>	$E_c = E_{c,normativa}(1 - 0.24\%RCA)$

Tabla IV-17. Factores de corrección propuestos para la estimación de la resistencia a tracción y el módulo de deformación en hormigones reciclados

## 5.3 Diagrama tensión - deformación

La presencia de árido reciclado influye significativamente en las propiedades deformacionales de los hormigones, hecho que se traduce en una curva  $\sigma$ - $\epsilon$  más tendida con mayores deformaciones de pico y última en los hormigones reciclados. Este efecto puede atribuirse a la presencia de mortero adherido a los áridos y a la generación de una interfaz pasta-árido más deformable.

En las series H65 y H50 con el 100% de sustitución se constataron incrementos en la deformación de pico respecto del convencional del 18 y 23%, respectivamente. Los incrementos detectados para el caso de la deformación última fueron del 18% para el H65-100 y del 21% para el H50-100.

De nuevo, la serie H50 acusa una mayor influencia del árido reciclado en su diagrama tensión-deformación que la H65.

Se ha calculado, por último, un factor exclusivamente dependiente del porcentaje de árido reciclado para corregir las expresiones que, en las distintas normas y códigos, proporcionan valores de la deformación de pico y última para los hormigones convencionales. Con ello se consigue predecir ambas deformaciones en los hormigones reciclados con la misma ratio "*deformación experimental/ deformación teórica*" que en los convencionales (Tabla IV-18).

Corrección propuesta	
<b>Deformación de pico</b>	$\varepsilon_{c0} = \varepsilon_{c0,teórico} (1 + 0.35 \%RCA)$
<b>Deformación última</b>	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu,teórico} (1 + 0.22 \%RCA)$

Tabla IV-18. Factores de corrección propuestos para estimación de la deformación de pico y última en hormigones reciclados

## 5.4 Retracción

En los hormigones reciclados aumenta la deformación de retracción, respecto a la de sus correspondientes hormigones de control, al crecer el porcentaje de sustitución del árido grueso. En los hormigones fabricados íntegramente con árido grueso reciclado, en ambas series de estudio, el aumento alcanza a 1000 días el 77% de la retracción que experimentan los hormigones de control convencionales.

Se ha observado, de nuevo, que los hormigones de la serie H50 acusan ligeramente más la incorporación del reciclado que los de la serie H65.

Se ha constatado un desarrollo más lento de la deformación de retracción en los hormigones fabricados con árido reciclado. La pre-saturación del árido grueso reciclado, origina, posiblemente, un exceso de agua en los hormigones reciclados que podría retrasar el inicio de la retracción. Este efecto, consecuencia del uso del árido reciclado pre-saturado, ya ha sido constatado por otros autores [CORI10] bajo la denominación de “curado interno” (internal curing).

Con el fin de mantener las ratios “retracción experimental/ retracción teórica” similares a las obtenidas en los hormigones convencionales, se deberá introducir un coeficiente corrector para la estimación de la deformación de retracción en hormigones reciclados con distinto porcentaje de sustitución. Además, para tener en cuenta el desarrollo más lento de la deformación de retracción en los hormigones fabricados con árido pre-saturado este coeficiente adoptará valores diferentes con la edad

Mediante regresión multivariable se ha ajustado la expresión que, en función del porcentaje de árido reciclado empleado (%RCA, en tanto por uno) y la edad del hormigón (t, en días), permite calcular el coeficiente corrector que debe aplicarse en cada instante a la ecuación normativa de cálculo de la retracción para mantener la misma ratio “retracción teórica/ retracción experimental” en hormigones convencionales y en hormigones reciclados *Tabla IV-19*.

Corrección propuesta	
<b>Retracción</b>	$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh,normativa} (1 + 0.44 \%RCA) \left( e^{0.01 \%RCA \left[ 1 - \left( \frac{90}{t} \right)^{(1.82 - 1.04 \%RCA)} \right]} \right)$

Tabla IV-19. Factor de corrección propuesto para la estimación de la deformación de retracción en hormigones reciclados

## 5.5 Fluencia

Con el objetivo de conocer la influencia del árido reciclado en las deformaciones bajo carga sostenida, se han calculado las deformaciones de fluencia por unidad de tensión (fluencia unitaria) y los coeficientes de fluencia para cada uno de los hormigones de estudio.

La fluencia unitaria en hormigones reciclados es mayor que en los convencionales, incrementándose para el 100% de sustitución un 51% y 73% respecto a los hormigones de control en las series H50 y H65, respectivamente.

Los hormigones de la serie H50 presentan coeficientes de fluencia muy similares, a excepción del H50-100 que experimenta un aumento del 30% respecto al obtenido para el hormigón de control. En los hormigones de la serie H65 el coeficiente de fluencia aumenta ligeramente con porcentajes de sustitución del árido grueso natural por reciclado, siempre que éste sea inferior al 50%, mientras que cuando la sustitución es total, H65-100, el incremento alcanza un 43%

Del análisis de la necesidad de correcciones para la predicción de los coeficientes de fluencia de acuerdo a las diferentes normativas, se concluye que a edades elevadas (por encima de 90 días) el hecho de emplear la resistencia a compresión experimental y el módulo de deformación teórico corregido según el porcentaje de árido reciclado presente en cada hormigón mantiene prácticamente constantes las ratios “coeficiente  $\phi$  experimental/ coeficiente  $\phi$  teórico” con independencia del porcentaje de sustitución empleado. Sin embargo, de nuevo el efecto del “Internal Curing” hace que el coeficiente de fluencia a edades tempranas presente una evolución diferente en hormigones reciclados que en los convencionales. En este caso, este efecto retrasa el desarrollo de las resistencias, haciendo que los hormigones reciclados a edades tempranas presenten una mayor deformabilidad.

De esta forma, para conseguir el mismo nivel de precisión entre los hormigones convencionales y los reciclados deberá ajustarse un coeficiente corrector para la estimación de la deformación de fluencia que, especialmente, tenga en cuenta el mayor desarrollo de la misma en estos hormigones a edades inferiores a 90 días de edad.

Se realiza el ajuste del coeficiente corrector mediante regresión multivariable obteniéndose una expresión función, únicamente, de la edad ( $t$ , edad del hormigón y  $t_0$  edad de carga) e independiente del porcentaje de árido reciclado empleado. Este coeficiente debe aplicarse en cada instante a la ecuación normativa de cálculo de la fluencia en hormigones reciclados para tener en cuenta el retraso en el desarrollo de las resistencias de los mismos (Tabla IV-20).

Corrección propuesta	
<b>Coeficiente de fluencia</b>	$\phi = \phi_{normativa} \left( e^{0.05 \left[ \left( \frac{90-t_0}{t-t_0} \right) \right]} - 1 \right)$

Tabla IV-20. Factor de corrección propuesto para la estimación del coeficiente de fluencia en hormigones reciclados

---

# V.FLEXIÓN BAJO CARGAS INCREMENTALES

---

## 1 INTRODUCCIÓN

Los ensayos estructurales se llevaron a cabo sobre vigas biapoyadas sometidas a dos cargas puntuales dispuestas de forma que se produjese un tramo central de flexión constante, tal y como se ha descrito en el *Capítulo III* de este documento.

Inicialmente se realizó el estudio del comportamiento a flexión bajo cargas incrementales hasta rotura, para el que se realizaron 8 ensayos (4 vigas de cada una de las series H50 y H65) a los 28 días de edad (Fase Vigas I). Como se describió en el *Capítulo III*, para la fabricación de las vigas se han diseñado dos tipos de hormigón, uno de resistencias mecánicas elevadas y relación agua/cemento de 0.5 (H50), y otro de relación agua/cemento 0.65, con menor capacidad resistente (H65).

Las vigas fabricadas con cada una de las series de hormigón se han proyectado para diferentes tipos de ambiente. La serie H65 se diseña para la clase de exposición no agresiva (ambiente I) y no sometida a ningún proceso de agresión (interiores de edificios no sometidos a condensaciones o elementos de hormigón armado). La serie H50 se diseña para la clase de exposición IIIa, sometida a proceso de agresión por cloruros (estructuras marinas por encima del nivel de pleamar y elementos exteriores de estructuras situadas a menos de 5 km de la línea costera). El tipo de ambiente ha condicionado el contenido de cemento, 275 kg/m<sup>3</sup> y 380 kg/m<sup>3</sup> para la serie H50 y H65, respectivamente, y el recubrimiento de las vigas, 20 mm en la serie H50 y 35 mm en la H65 (*Figura V-1*). La diferencia de canto útil dificulta la comparación del comportamiento estructural entre ambas series causada por las propiedades del hormigón, ya que la mayor deformabilidad esperada en las vigas de la serie H65, cuyo hormigón tiene menor módulo que el de la serie H50, se ve mitigada por el incremento en su canto útil.

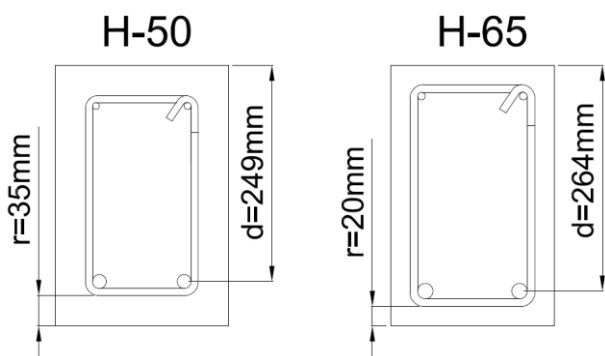


Figura V-1. Sección de las vigas

2 NOMENCLATURA DE LA INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación de las vigas ensayadas estaba constituida por galgas extensométricas, células de carga y transductores de desplazamiento, que recogieron en cada instante los valores de deformaciones, cargas y flechas, respectivamente.

La descripción exhaustiva de la instrumentación empleada se detalla en el *Capítulo III*. Sin embargo, se presentan aquí dos esquemas (*Tabla V-1* y *Tabla V-2*) que identifican la empleada específicamente para el desarrollo de esta fase experimental.

EE2	EE1	EW2	EW1	IE143	IE178	IE213	IW143	IW178	IW213	SE143	SE178	SE213	SW143	SW178	SW213
Estribos (E): este (E) - oeste (W)				Armadura inferior (I) de tracción: este (E) - oeste (W)						Armadura superior (S) compresión: este (E) - oeste (W)					

Diagrama de instrumentación en el acero (galgas). Muestra dos secciones de vigas con refuerzo. La parte superior muestra la armadura superior (S) con sensores SE143, SE178, SE213 y EE1, EE2. La parte inferior muestra la armadura inferior (I) con sensores IE143, IE178, IE213, IW143, IW178, IW213, EW1, EW2. Los sensores están indicados por líneas punteadas que conectan con los códigos en la parte superior de la tabla.

Tabla V-1. Instrumentación en el acero (galgas)



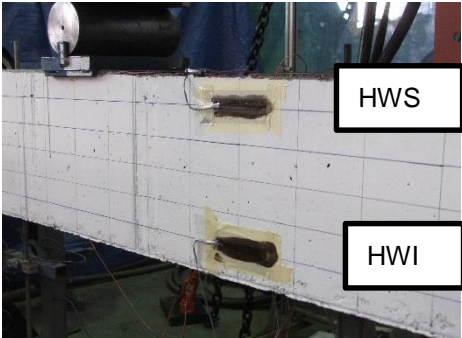
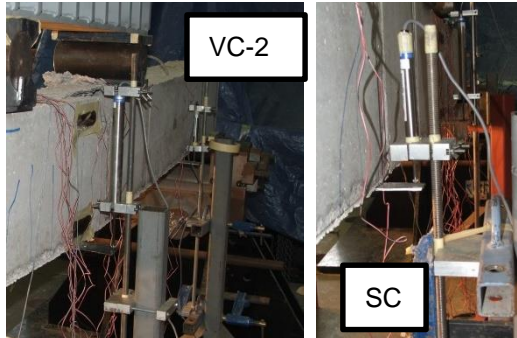
HES	HWS	HEI	HWI	VC-1	SC	VC-2
Galgas en el hormigón (H) en la sección central: cara este (E) y oeste (W), superior (S) e inferior (I)				Transductores de desplazamiento en la sección central (SC) y vanos de cortante (VC)		
						

Tabla V-2. Instrumentación en el hormigón (*galgas*) y en las vigas (*transductores*)

### 3 COMPORTAMIENTO BAJO CARGAS INCREMENTALES

Para el estudio del comportamiento bajo cargas incrementales (Fase Vigas I) las vigas se sometieron a carga creciente hasta rotura. A partir de los resultados obtenidos durante el ensayo se realizó un análisis seccional, utilizando las curvas momento – deformación, en las que las deformaciones representadas corresponden a las obtenidas por la instrumentación en diversas secciones, y las relaciones momento – curvatura, calculándose éstas a partir de las deformaciones en las armaduras longitudinales superior e inferior.

Además del análisis seccional se realizó un análisis de solicitaciones, para el que se definieron los momentos singulares de estudio (momento de fisuración- $M_{fis}$ , momento de plastificación- $M_{plast}$  y momento máximo- $M_{máx}$ ). Adicionalmente, se decidió utilizar dos momentos de referencia, el correspondiente a las cargas de servicio (momento de servicio- $M_{serv}$  de 30.22 kNm) y el asociado a la flecha máxima admitida en el CTE ( $M_{L350}$ ), dependiente de la geometría de la viga según la relación  $L/350$  que en este caso equivale a 9.71 mm.

También se estudió la progresión de flechas y fisuras, utilizándose como flechas de referencia las asociadas a las solicitaciones definidas en el párrafo anterior. Se limitó el estudio de la fisuración al registro de su evolución mediante mapas de fisuras, descartándose experimentalmente la medida del ancho de fisura.

Todos los resultados experimentales obtenidos se han comparado con las estimaciones teóricas propuestas por diferentes normativas, a efectos de evaluar su adecuación al proyecto con hormigones reciclados e introducir, de ser necesarios, factores de corrección. El objetivo, como al caracterizar los hormigones, es evaluar la bondad de las expresiones normativas en la predicción del comportamiento estructural (rotura, fisuración, flechas...) de los hormigones reciclados. Para ello, de nuevo, se aceptan las expresiones existentes, proponiéndose la incorporación de un factor de corrección que, dependiente del porcentaje de árido reciclado empleado, consiga una aproximación equivalente en las predicciones con hormigones reciclados a la obtenida con los hormigones convencionales.

#### 3.1 Análisis seccional

En cada una de las vigas se instrumentó la armadura longitudinal en tres secciones del tramo central de flexión constante, identificadas como 143, 178 y 213, en referencia a la distancia a la

que se encuentran del extremo de la viga (*Tabla V-1*). La sección central (178) dispone, además, de galgas en el hormigón situadas a la altura de la armadura longitudinal.

El análisis seccional que se plantea pretende determinar la evolución de deformaciones hasta rotura y conocer la curvatura desarrollada por cada uno de los hormigones de estudio.

### 3.1.1 Deformaciones

Las deformaciones registradas por las galgas del hormigón y acero de ambas caras (este y oeste) presentan una gran similitud en todas las vigas, lo que garantiza la ausencia de esfuerzos torsores que habrían distorsionado los ensayos. Las deformaciones de la armadura de compresión, de tracción y de los estribos de las secciones 143 y 213, así como de la sección central 178 en la que, además, aparece la deformación del hormigón, se muestran de la *Figura V-2* a la *Figura V-5*.

La deformación de la armadura de tracción confirma el tipo de rotura, indicando que se ha producido la plastificación del acero en todas las vigas al alcanzarse valores en la sección central del 10%. El comportamiento dúctil queda corroborado, además, con las deformaciones de la armadura de compresión, de pequeña magnitud y similares a las registradas en el hormigón de la zona comprimida. Por otra parte, el análisis detallado de las deformaciones de tracción en la armadura y en el hormigón permitirá determinar experimentalmente la carga y el momento de fisuración.

Por último, la deformación en los estribos informa sobre el comportamiento de las vigas frente a esfuerzos de cortante que, en este caso, son de pequeña magnitud.

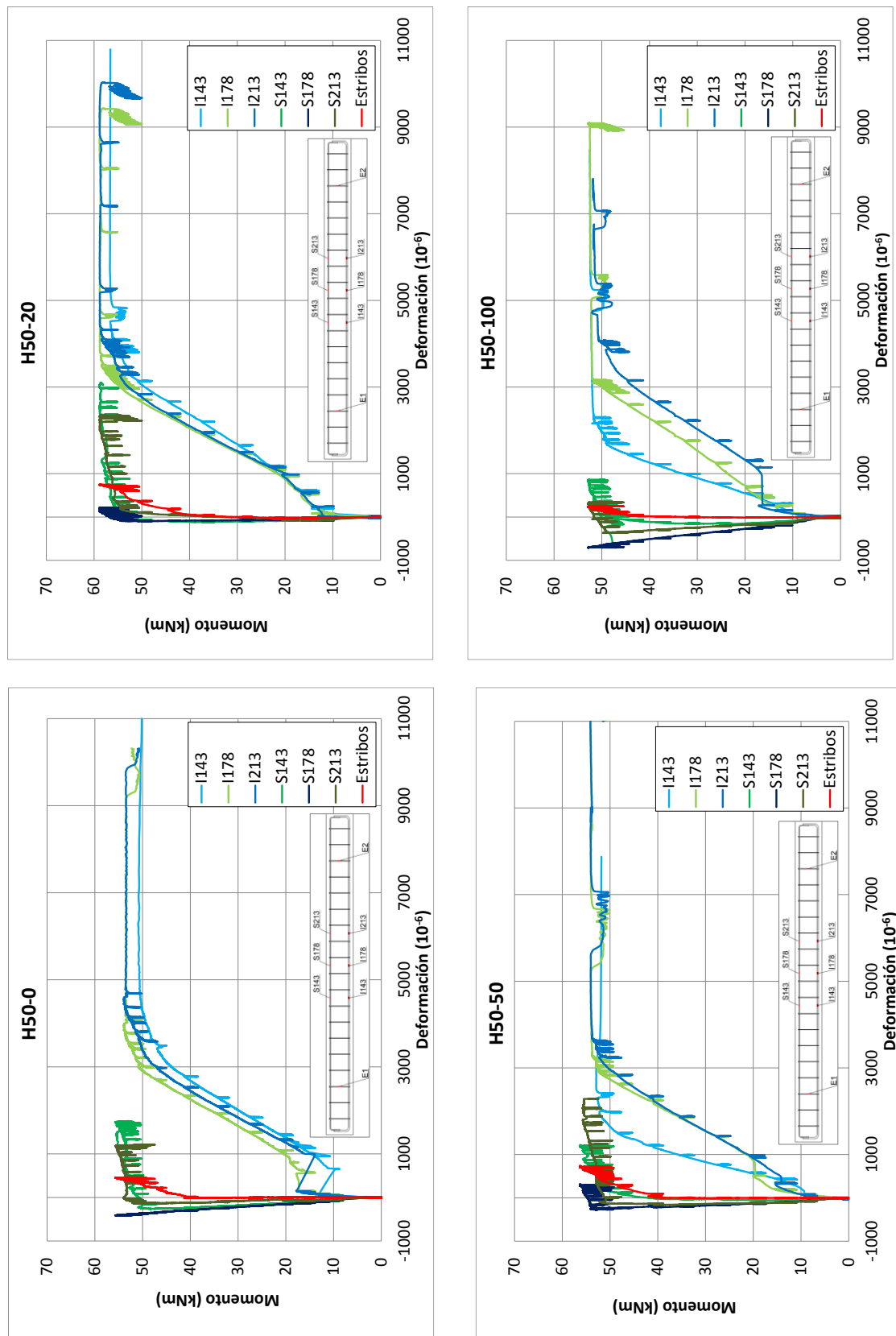


Figura V-2. Deformación en la armadura. H50

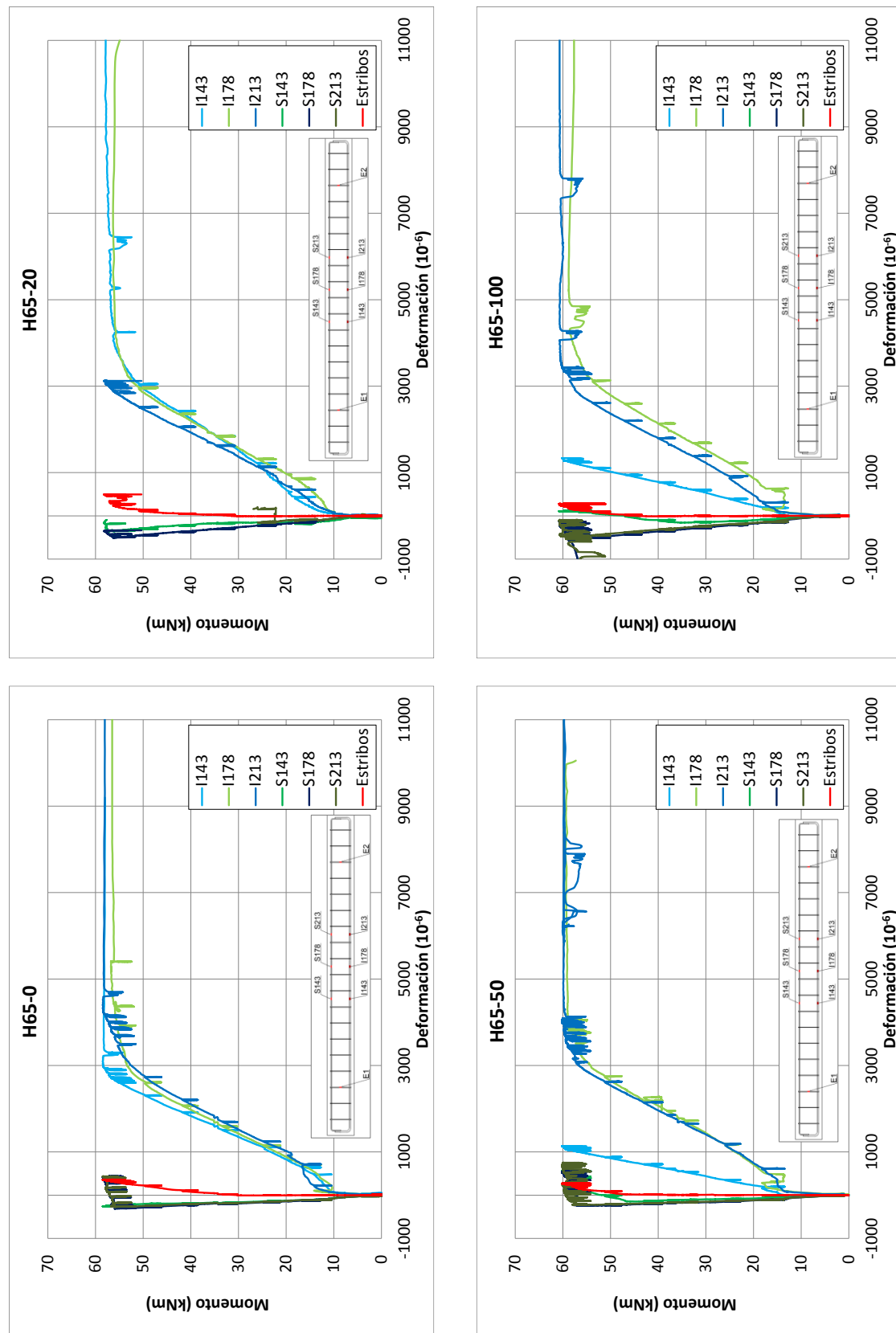


Figura V-3. Deformación en la armadura. H65

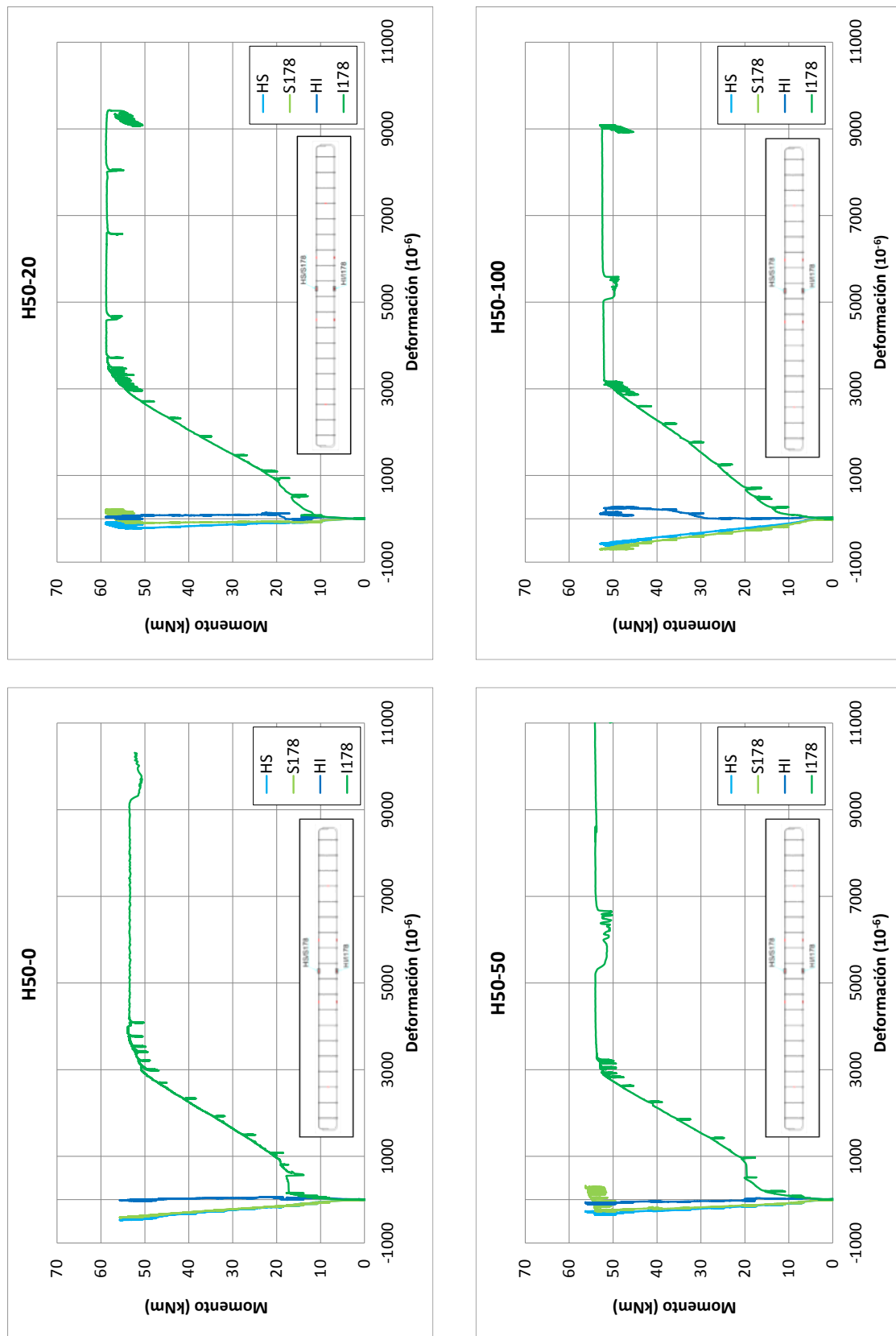


Figura V-4. Deformación en la sección central, hormigón y acero. H50

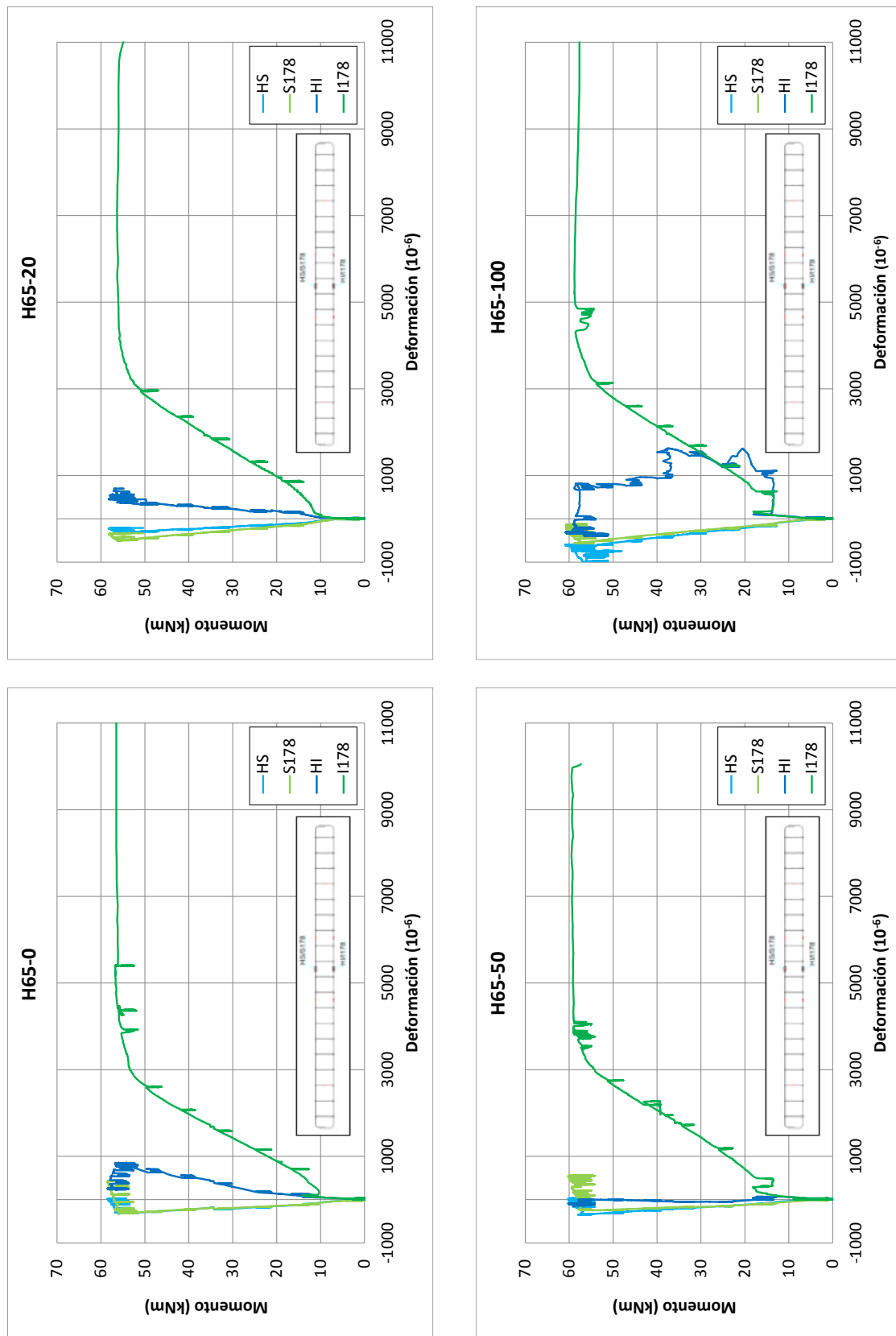


Figura V-5. Deformación en la sección central, hormigón y acero. H65

### 3.1.2 Diagramas Momento - Curvatura

A partir de las deformaciones en la armadura longitudinal en la sección central de la viga, se obtuvieron los diagramas Momento – Curvatura (M-C) para cada uno de los hormigones de estudio (*Figura V-6* y *Figura V-7*). En ellos se observa, como tendencia general e independientemente del porcentaje de árido reciclado empleado, una prolongada rama plástica que confirma el comportamiento dúctil de las vigas. En todos los casos se obtienen curvaturas finales elevadas, superiores a  $40 \text{ km}^{-1}$ .

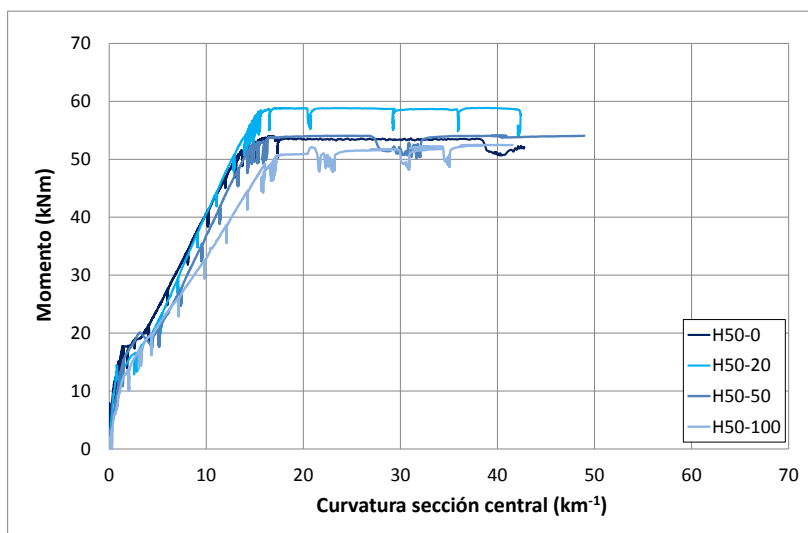


Figura V-6. Diagramas M-C en la sección central. H50

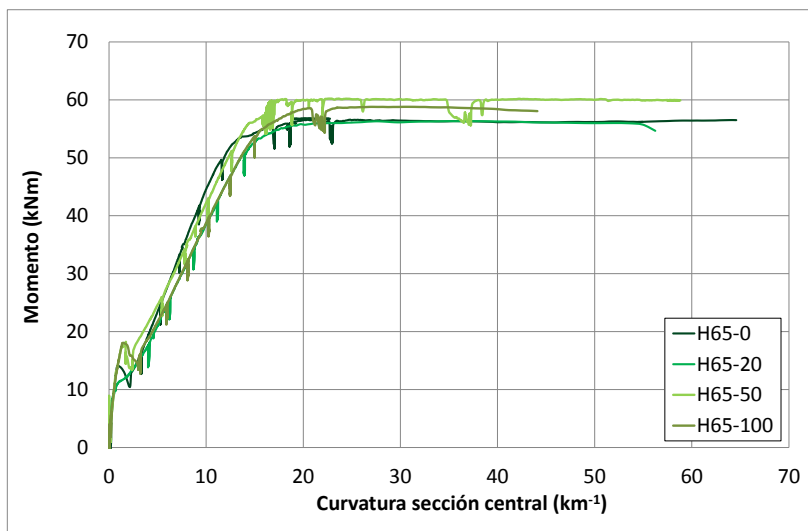


Figura V-7. Diagramas M-C en la sección central. H65

Se constatan curvaturas ligeramente superiores en los hormigones reciclados que en los convencionales, debido esencialmente al menor módulo de deformación que presentan. Analizando la curvatura para el momento de servicio ( $30.22 \text{ kNm}$ ), se obtienen en la sección central de las vigas fabricadas con el 100% de sustitución de la fracción gruesa, para la serie H50 y H65 respectivamente, curvaturas un 28% y 14% superiores que en los convencionales.

### 3.2 Análisis de solicitaciones

#### 3.2.1 Momentos de fisuración, servicio, plastificación y rotura

Los diagramas momento - curvatura y momento – deformación de la sección central (a partir de las medidas de las galgas en hormigón y armadura longitudinal) permiten determinar los valores experimentales de los momentos de fisuración, plastificación y rotura. El registro de flechas, además, proporciona el momento  $M_{L350}$ , asociado a la flecha máxima admitida en el CTE (limitada a  $L/350$ , en este caso igual a 9.71 mm).

En la *Tabla V-3* se detallan los momentos flectores experimentales obtenidos, así como las ratios  $M_{L350}/M_{fis}$ ,  $M_{plast}/M_{fis}$ ,  $M_{máx}/M_{fis}$  y  $M_{máx}/M_{plast}$  para cada tipo de hormigón.

	$M_{fis}$	$M_{L350}$	$M_{plast}$	$M_{máx}$	$M_{fis}/M_{plast}$	$M_{fis}/M_{máx}$	$M_{plast}/M_{máx}$
<b>H50-0</b>	13.04	28.87	50.94	55.71	0.26	0.23	0.91
<b>H50-20</b>	11.62	31.40	54.49	58.89	0.21	0.20	0.93
<b>H50-50</b>	7.10	29.37	52.25	56.32	0.14	0.13	0.93
<b>H50-100</b>	7.00	26.96	49.19	52.93	0.14	0.13	0.93
<b>H65-0</b>	11.32	35.15	56.00	58.51	0.20	0.19	0.96
<b>H65-20</b>	10.13	36.30	55.52	58.27	0.18	0.17	0.95
<b>H65-50</b>	9.02	35.87	57.95	60.21	0.16	0.15	0.96
<b>H65-100</b>	8.33	32.17	58.79	60.83	0.14	0.14	0.97

Tabla V-3. Momentos  $M_{fis}$ ,  $M_{L350}$ ,  $M_{plast}$  y  $M_{máx}$  (kNm) y ratios

Los resultados indican que el momento de fisuración disminuye significativamente con el porcentaje de árido reciclado empleado, acorde con las disminuciones observadas en la resistencia a tracción. Respecto a sus hormigones de control, en los hormigones con el 20%, 50% y 100% de árido reciclado los momentos de fisuración se reducen, respectivamente, un 11%, 45% y 46% en la serie H50 y un 10%, 20% y 26% en la serie H65. Sin embargo, los momentos de plastificación y máximo apenas se ven afectados por la presencia de árido reciclado. Esto se atribuye, esencialmente, a que el dimensionamiento de las vigas se ha realizado para obtener roturas dúctiles, lo que implica que el hormigón tiene una contribución limitada en rotura (*Figura V-8*). Finalmente, en el  $M_{L350}$  se aprecian reducciones cuando el porcentaje de sustitución es elevado. Para el 100% de sustitución las reducciones, respecto del hormigón de control, son del 9% y del 7% para las series H65 y H50 respectivamente.

El dimensionamiento para rotura dúctil de las vigas permite que los momentos de plastificación y máximo de las vigas apenas se alteren con la incorporación de árido reciclado, mientras que su menor resistencia a tracción hace disminuir sensiblemente los momentos de fisuración, lo que supone que la fisuración de los hormigones reciclados se alcanza para porcentajes de carga máxima o de plastificación menores a los de sus hormigones convencionales de control.

El análisis de las ratios  $M_{fis}/M_{plast}$  y  $M_{fis}/M_{máx}$  confirma la fisuración prematura de los hormigones reciclados. Así, en la serie H65, el valor de  $M_{fis}/M_{plast}$  para el 100% de sustitución, se sitúa en 0.14, mientras que el del hormigón de control llega a 0.20. En la serie H50 se obtienen valores de 0.14 para el 100% de sustitución, y 0.26 para el hormigón de control. De nuevo se observa una mayor influencia del contenido de árido grueso reciclado en los H50, con un descenso de las ratios  $M_{fis}/M_{plast}$  y  $M_{fis}/M_{máx}$  en el H50-100 respecto al convencional del 45%, frente al 30% que se produce para el H65-100.



Las ratios  $M_{\max}/M_{\text{plast}}$  son muy similares, con independencia del porcentaje de árido reciclado empleado. Tras la plastificación, de forma prácticamente inmediata, se alcanza el momento máximo.

Finalmente, la diferencia de canto útil contrarresta la mayor deformabilidad de los hormigones H65 haciendo que los momentos  $M_{L350}$ ,  $M_{\text{plas}}$  y  $M_{\max}$  de las vigas de la serie H65 sean superiores a los de la serie H50.

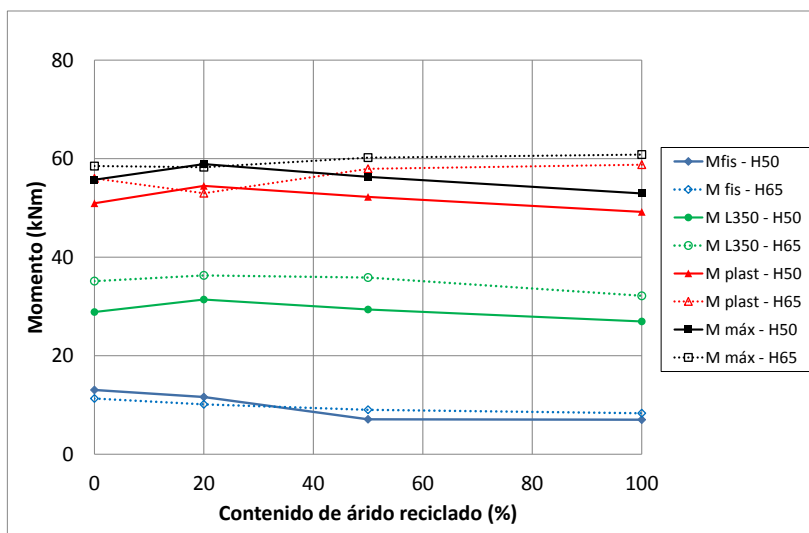


Figura V-8. Momentos flectores  $M_{\text{fis}}$ ,  $M_{L350}$ ,  $M_{\text{plast}}$  y  $M_{\max}$

### 3.2.2 Estimación de momentos flectores y propuesta de corrección

Con el objetivo de evaluar la bondad de las propuestas normativas en la predicción del comportamiento de los hormigones reciclados frente a solicitaciones de flexión, se han comparado los momentos de fisuración, plastificación y máximo, tanto los experimentales como los obtenidos a partir de las expresiones propuestas por diversas normativas (Figura V-8, Figura V-9, Figura V-10 y Figura V-11).

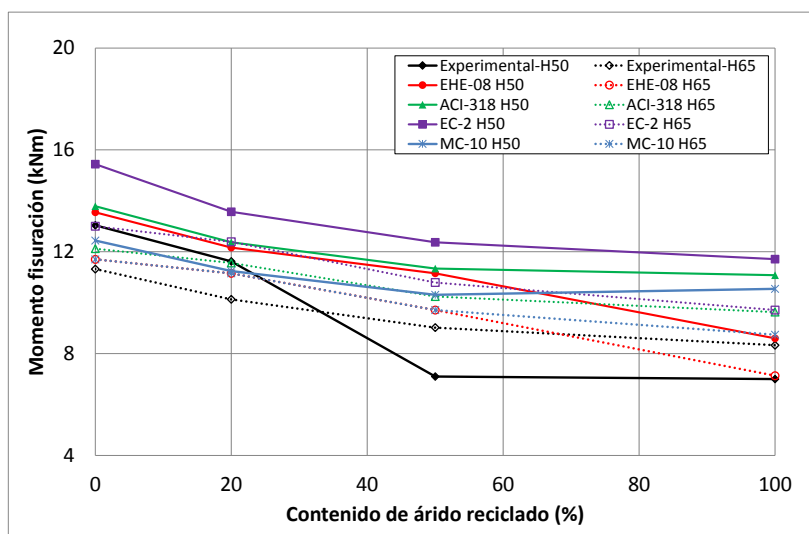


Figura V-9. Momentos de fisuración. Estimación teórica y resultados experimentales

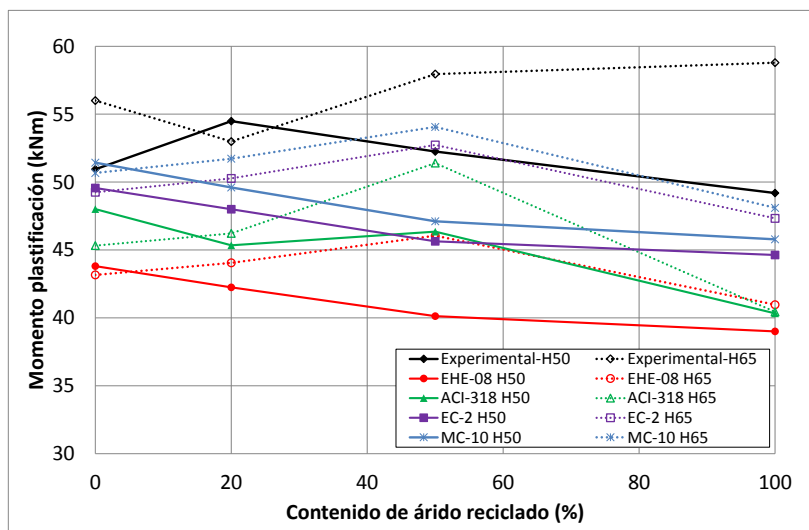


Figura V-10. Momentos de plastificación. Estimación teórica y resultados experimentales

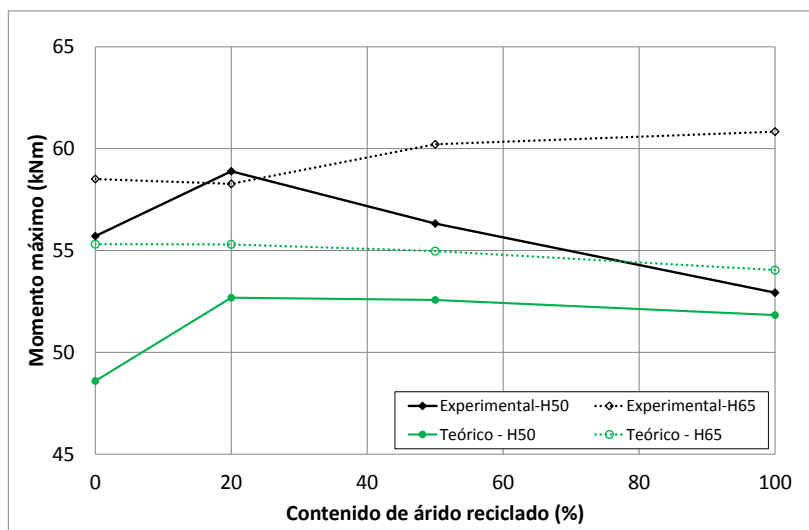


Figura V-11. Momento máximo. Estimación teórica y resultados experimentales

Los resultados obtenidos permiten constatar que las ratios “*momento experimental/ momento teórico*” de los hormigones reciclados presentan valores similares a las de los convencionales (Tabla V-4 a Tabla V-6). Esto indica que, para tener en cuenta la presencia de árido reciclado, es innecesario introducir correcciones en el método de cálculo de momentos propuesto en las normativas. Las correcciones sugeridas para las propiedades mecánicas utilizadas en el cálculo de los momentos (módulos de deformación, resistencia a tracción o deformaciones de pico y últimas) y el uso de la resistencia a compresión experimental, son suficientes para la correcta estimación de los mismos en hormigones reciclados.

	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H565-0	H65-20	H65-50	H65-100
<b>EHE-08</b>	0.96	0.96	0.64	0.81	0.97	0.91	0.93	1.17
<b>ACI-318</b>	0.95	0.94	0.63	0.63	0.93	0.88	0.88	0.87
<b>EC-2</b>	0.84	0.86	0.67	0.60	0.87	0.82	0.84	0.86
<b>MC-10</b>	1.05	1.03	0.69	0.66	0.97	0.91	0.93	0.95

Tabla V-4. Momento de fisuración. Ratios “ $M_{fis\ experimental}/ M_{fis\ teórico}$ ”

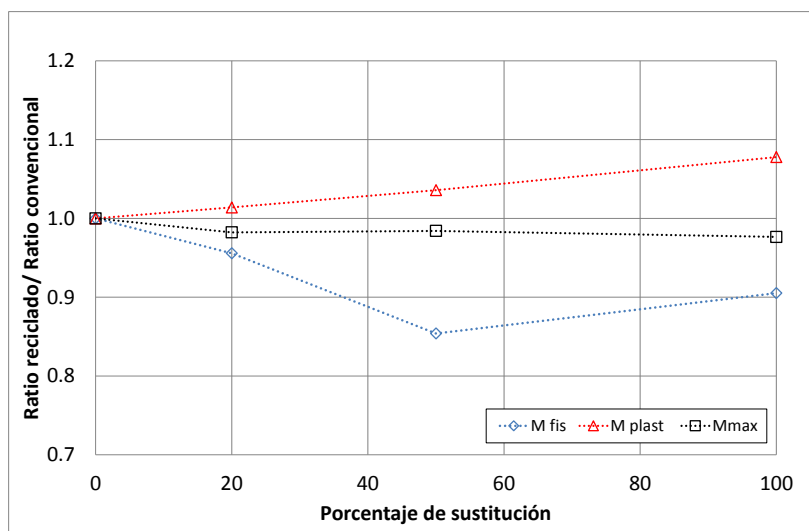
	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H565-0	H65-20	H65-50	H65-100
<b>EHE-08</b>	1.16	1.29	1.30	1.26	1.30	1.20	1.26	1.44
<b>ACI-318</b>	1.06	1.20	1.13	1.22	1.24	1.15	1.13	1.45
<b>EC-2</b>	1.03	1.14	1.14	1.10	1.14	1.05	1.10	1.24
<b>MC-10</b>	0.99	1.10	1.11	1.07	1.11	1.02	1.07	1.22

Tabla V-5. Momento de plastificación. Ratios " $M_{plast\ experimental} / M_{plast\ teórico}$ "

	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H565-0	H65-20	H65-50	H65-100
<b>Teórico</b>	1.15	1.12	1.07	1.02	1.06	1.05	1.10	1.13

Tabla V-6. Momento máximo teórico (kNm) y ratios " $M_{máx\ experimental} / M_{máx\ teórico}$ "

Finalmente, se muestra en la *Figura V-12* el ajuste realizado para el cálculo de los momentos de fisuración, plastificación y máximo, constatando así, que únicamente el momento de fisuración presenta diferencias del 10% respecto al convencional para altos porcentajes de sustitución (50 y 100%).

Figura V-12. Ajuste del coeficiente corrector para la predicción de los momentos  $M_{fis}$ ,  $M_{plast}$  y  $M_{máx}$ 

## 3.2 Análisis de fisuración y flechas

### 3.2.1 Desarrollo de fisuras

Como ya se ha mencionado, el estudio de la fisuración se limitó al registro de su evolución mediante mapas de fisuras, descartándose la medida experimental del ancho de las mismas. Durante el ensayo se llevó a cabo el marcado de fisuras mediante un código de colores asociado a los diferentes escalones de carga (*Figura V-13*). Los resultados que se presentan (*Figura V-14 a Figura V-21*) corresponden al desarrollo de fisuras en los cuatro escalones de carga correspondientes al 25%, 50%, 75% y 100% de la carga de máxima.

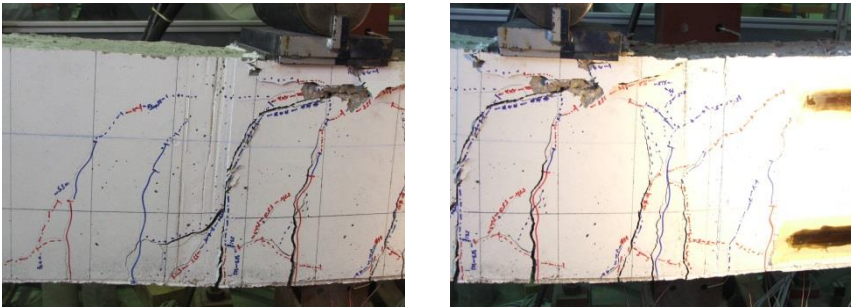


Figura V-13. Marcado de fisuras

<b>Tramo: 0-17 kNm (25%)</b>
<b>Tramo: 17-26 kNm (50%)</b>
<b>Tramo: 26-40 kNm (75%)</b>
<b>Tramo: 40 kNm - Máximo</b>

Figura V-14. Mapa de fisuras. H50-0

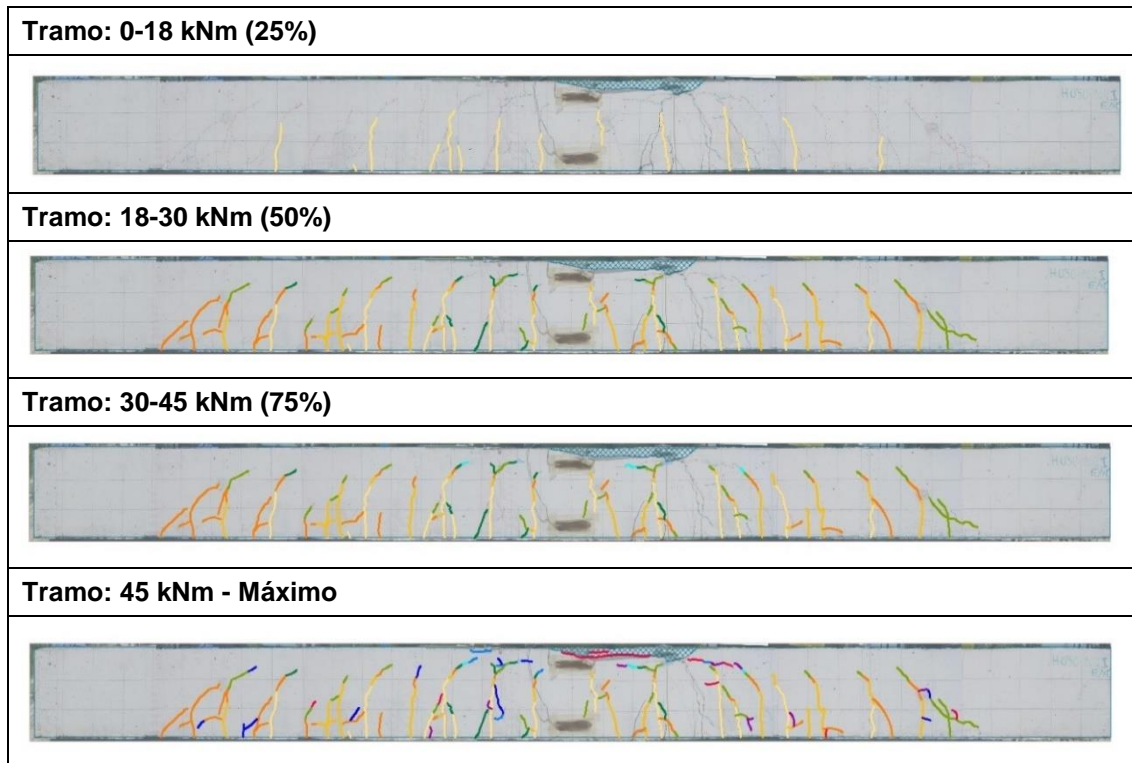


Figura V-15. Mapa de fisuras. H50-20

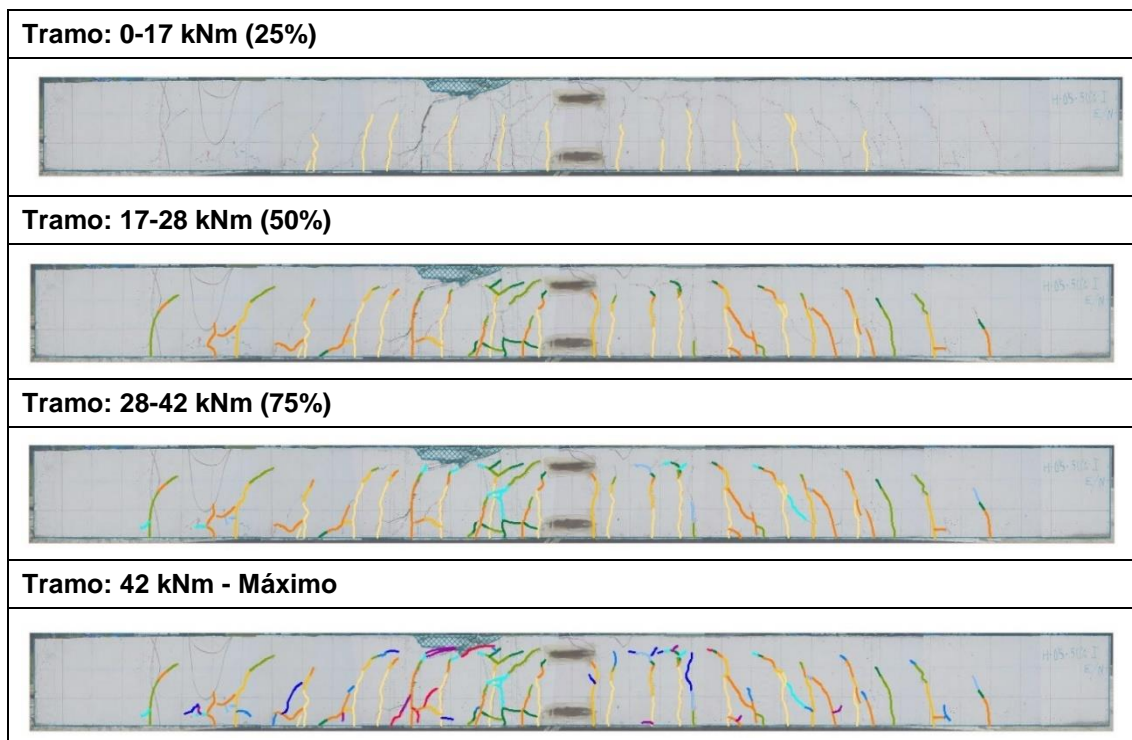


Figura V-16. Mapa de fisuras. H50-50



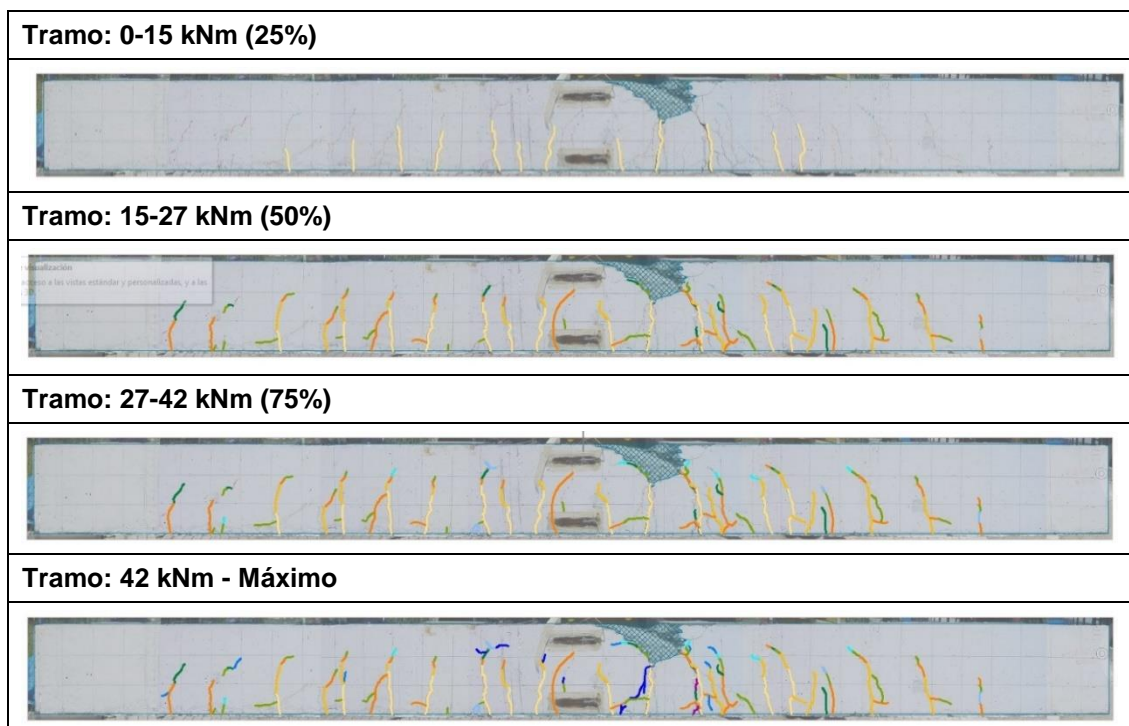


Figura V-17. Mapa de fisuras. H50-100

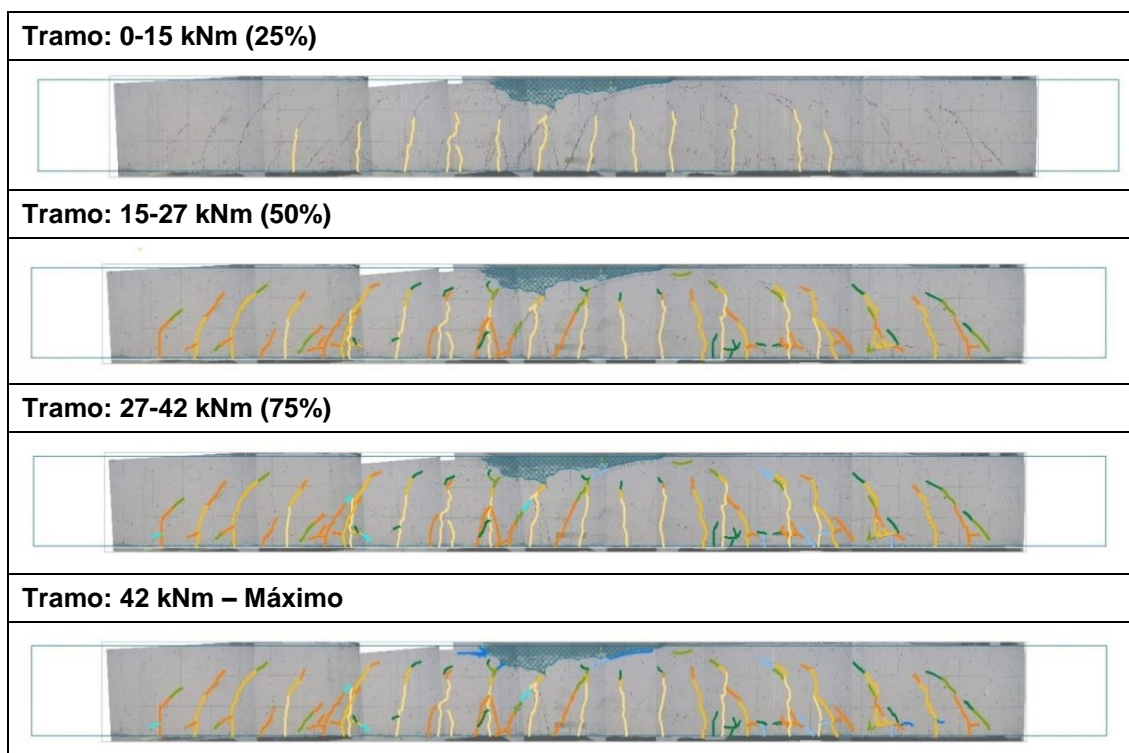


Figura V-18. Mapa de fisuras. H65-0

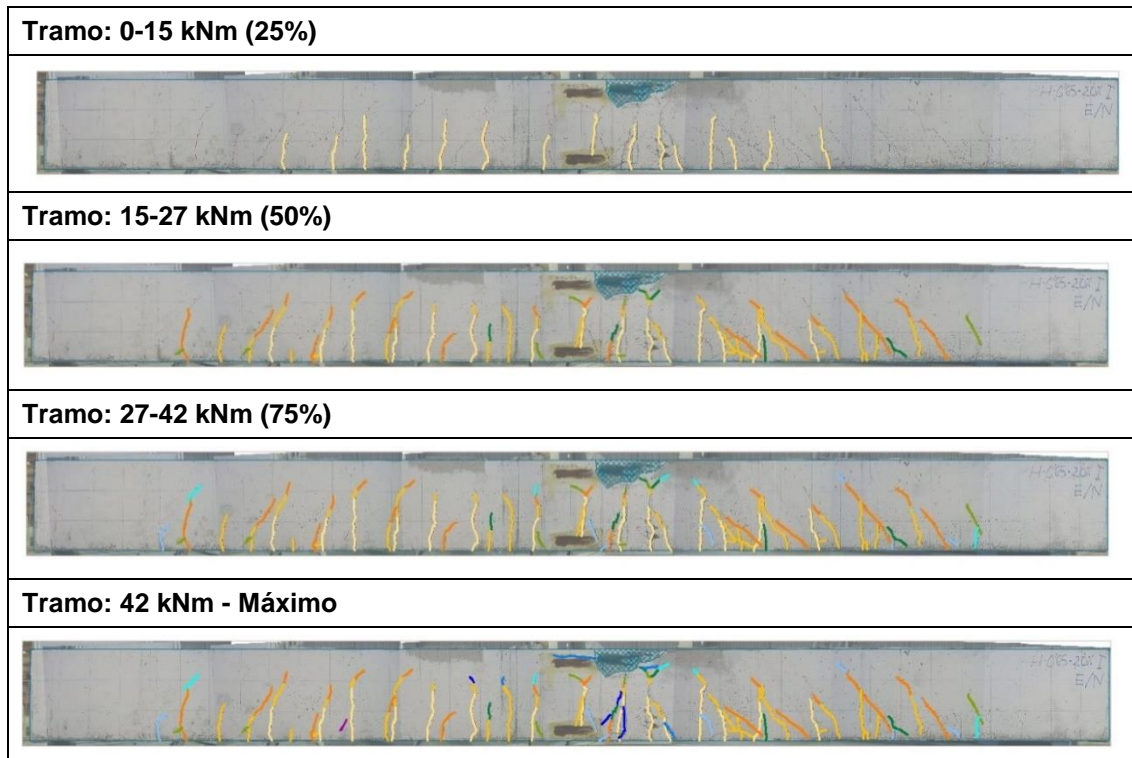


Figura V-19. Mapa de fisuras. H65-20

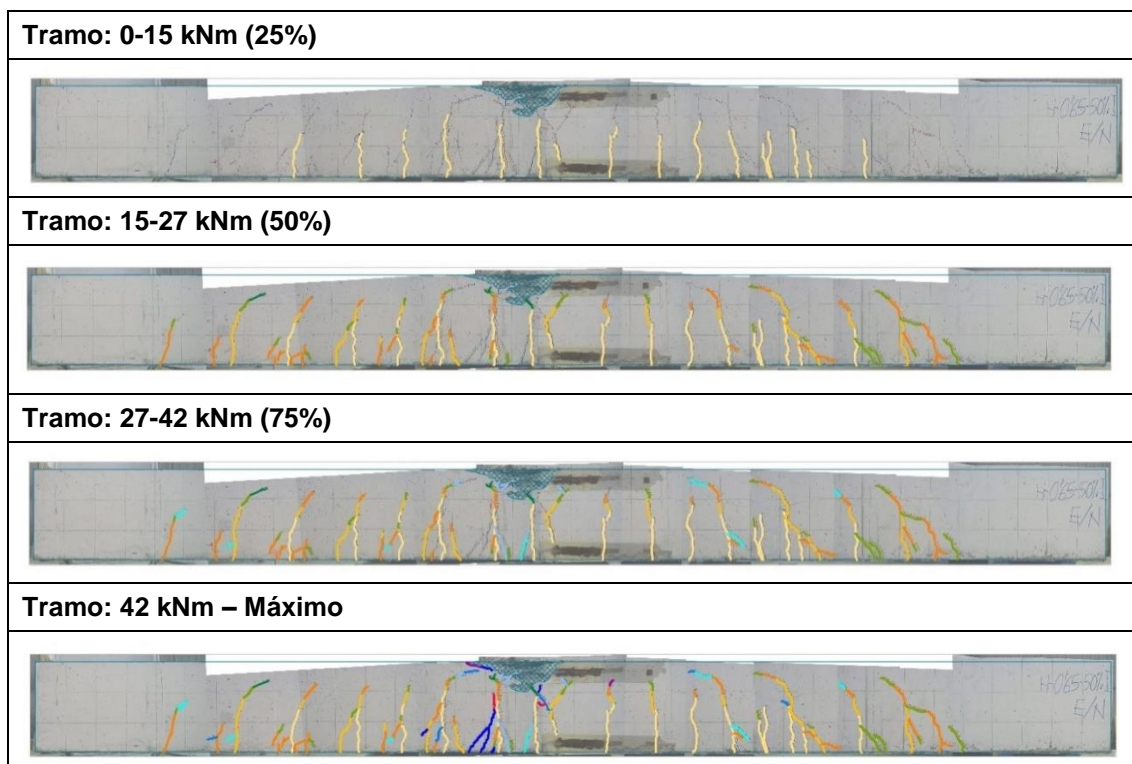


Figura V-20. Mapa de fisuras. H65-50

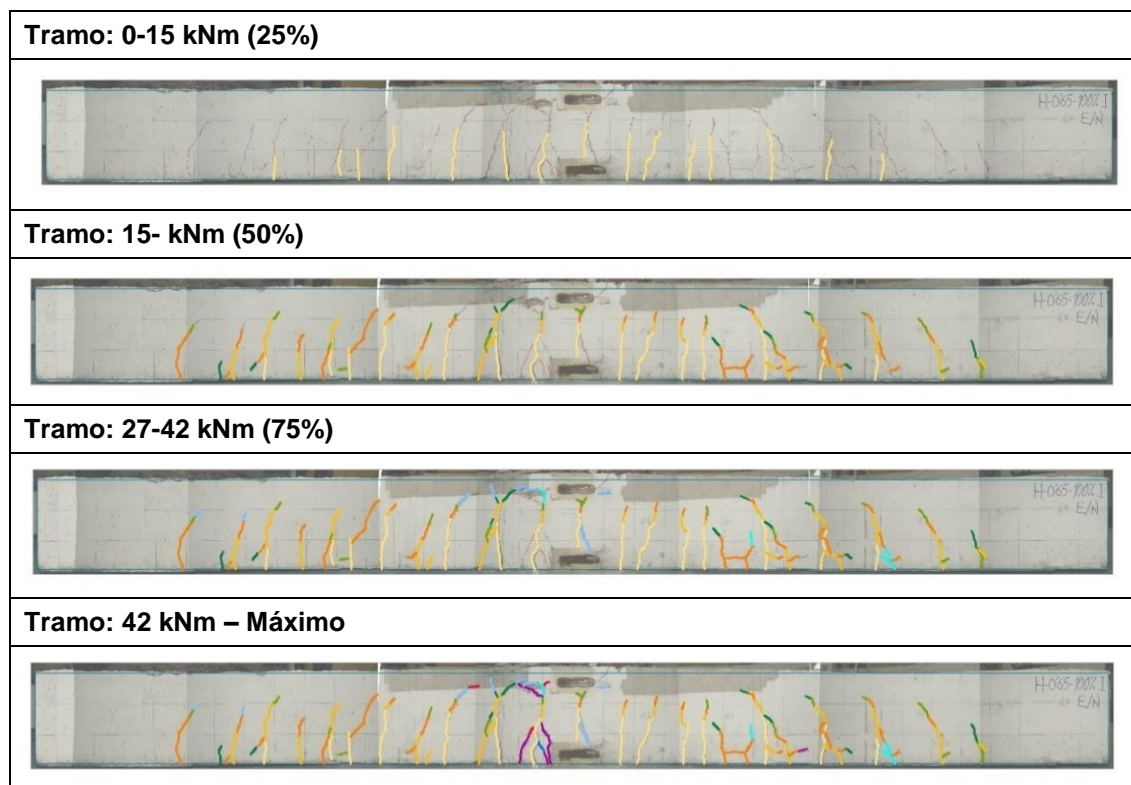


Figura V-21. Mapa de fisuras. H65-100

### 3.2.2 Flechas

En la *Figura V-23* y en la *Figura V-24* se muestran los diagramas Momento–flecha en la sección central y en los vanos de cortante para cada una de las vigas durante el ensayo (*Figura V-22*).



Figura V-22. Flechas en el ensayo bajo cargas incrementales

Para comprobar el comportamiento al que apuntan los diagramas Momento–flecha, se han determinado los valores experimentales de las flechas de referencia (*Tabla V-7*). Estos son los asociados a las solicitaciones analizadas en el apartado 3.2: flecha correspondiente al momento de fisuración ( $f_{Mfis}$ ), flecha correspondiente al momento de plastificación ( $f_{Mplast}$ ), flecha correspondiente al momento máximo ( $f_{Mmáx}$ ) y flecha correspondiente al momento de servicio ( $f_{Mserv}$ ).



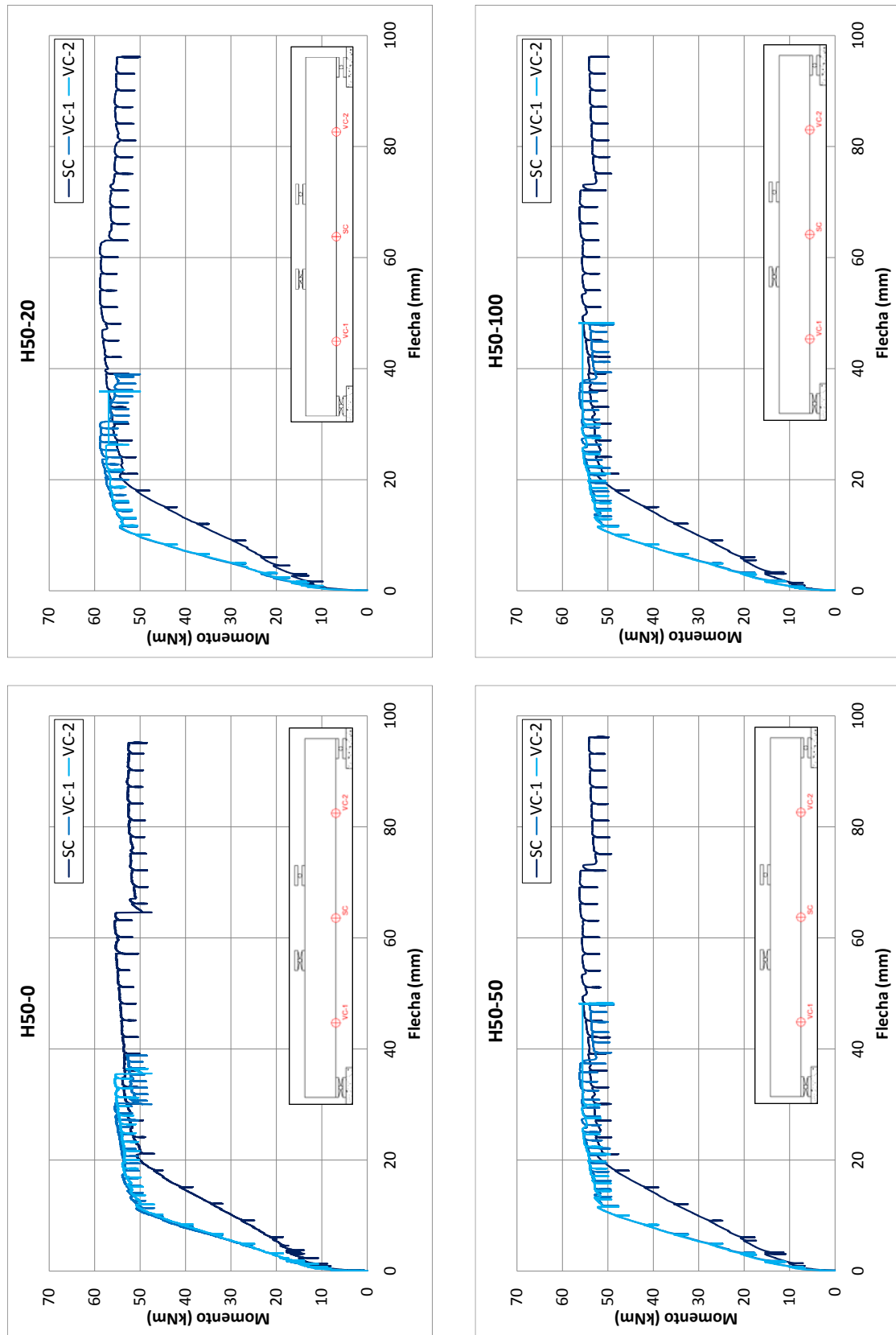


Figura V-23. Diagramas Momento-flecha. H50

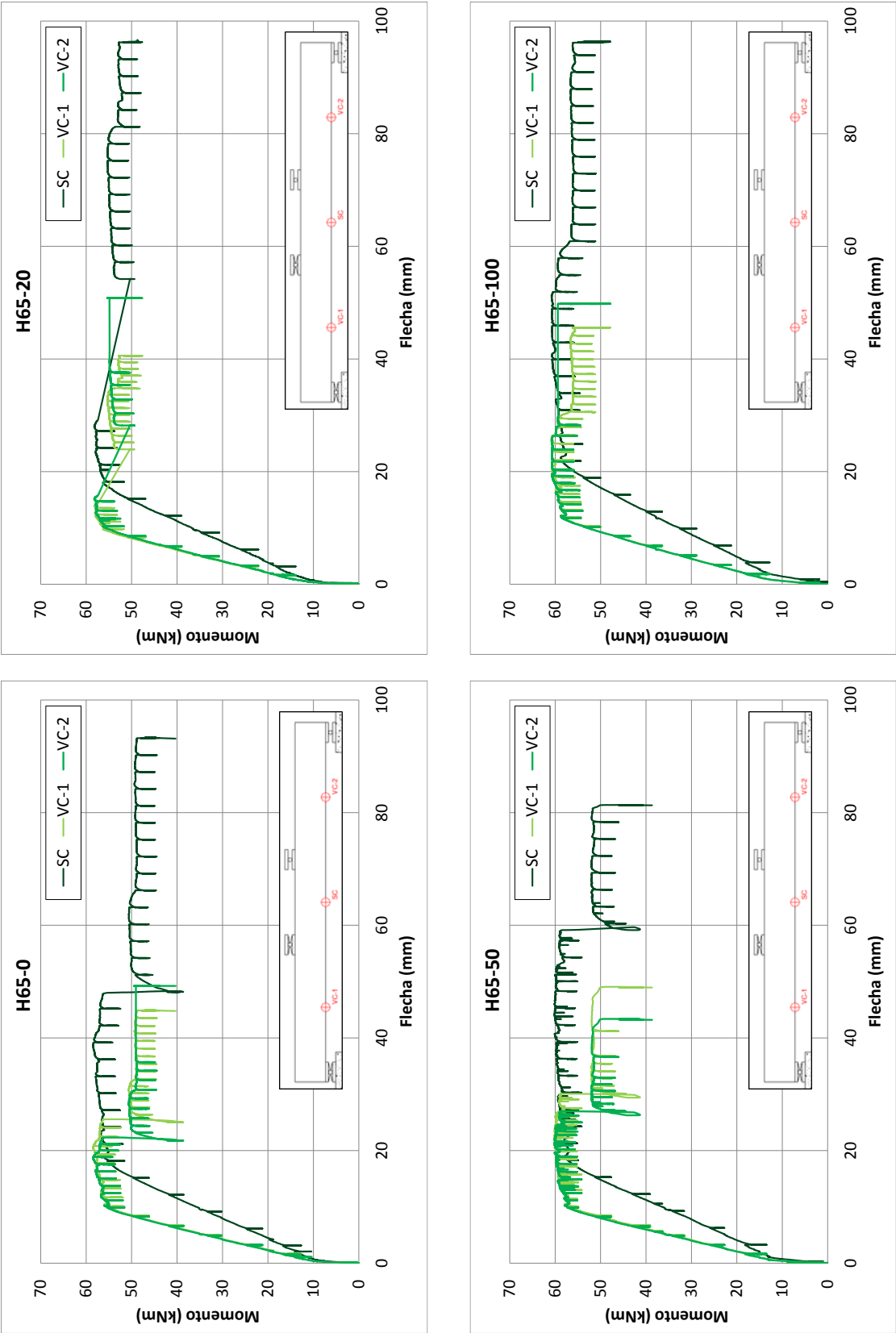


Figura V-24. Diagramas Momento-flecha. H65

	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H565-0	H65-20	H65-50	H65-100
$f_{Mfis}$	0.73	0.99	0.58	0.82	0.99	0.65	0.66	1.19
$f_{Mserv}$	10.27	9.31	10.05	11.17	8.05	7.67	7.91	8.94
$f_{Mplast}$	20.83	20.75	20.66	21.29	18.80	17.48	18.98	22.41
$f_{Mmáx}$	95.16	96.14	98.29	96.40	93.31	96.65	81.36	96.41

Tabla V-7. Flechas asociadas a los momentos  $M_{fis}$ ,  $M_{serv}$ ,  $M_{plast}$  y  $M_{máx}$  (mm)

Los diagramas Momento–flecha de todos los hormigones son muy similares en general, aumentando, aunque muy ligeramente, la flecha desarrollada por los hormigones reciclados con porcentajes de sustitución por encima del 20% (*Figura V-25* y *Figura V-26*).

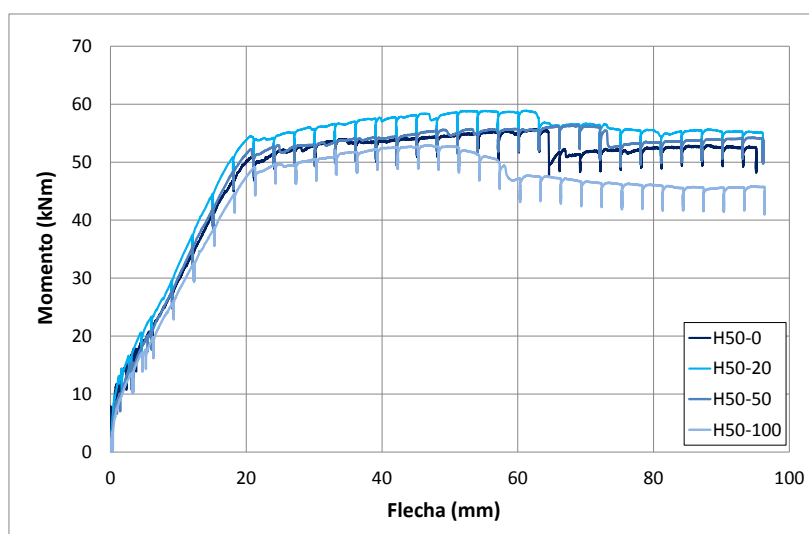


Figura V-25. Diagramas Momento-flecha en la sección central de la serie H50

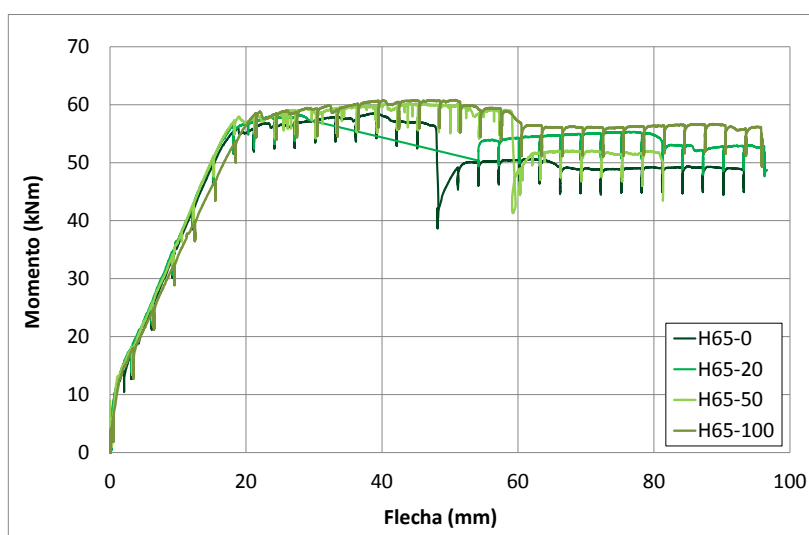


Figura V-26. Diagramas Momento-flecha en la sección central de la serie H65

Los resultados confirman pequeños incrementos de la flecha asociada al momento de servicio ( $f_{Mserv}$ ) cuando los porcentajes de sustitución son elevados (*Figura V-27*). Al igual que las curvaturas, el desarrollo de las flechas guarda relación con la deformabilidad del hormigón empleado. Así, la sensible reducción del módulo cuando el porcentaje de sustitución es del

100% supone incrementos de la flecha bajo el momento de servicio del 11% y del 9% para las series H65 y H50, respectivamente.

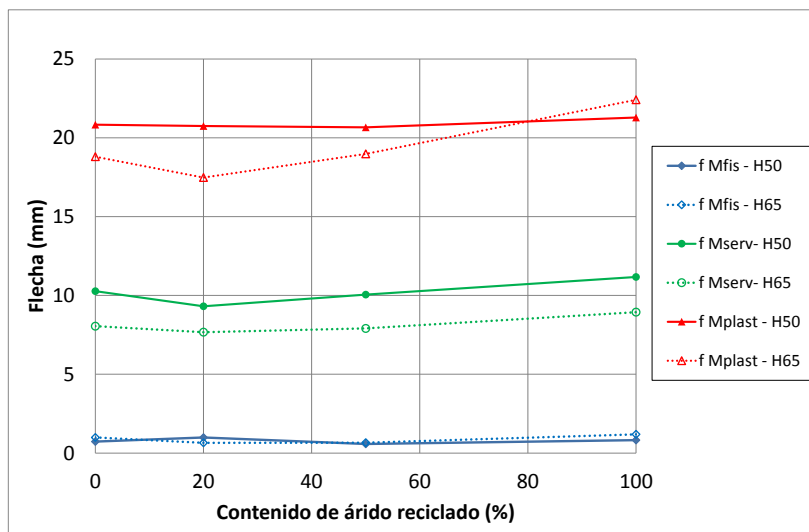


Figura V-27. Flechas asociadas a  $M_{fis}$ ,  $M_{serv}$ ,  $M_{plast}$  y  $M_{máx}$

## 3.2.3 Estimación de flechas y propuesta de corrección

De nuevo se evalúa la bondad de las propuestas normativas [EHE-08; ACI-318; EC-2; MC-10], para la predicción de flechas en servicio cuando se utilizan hormigones reciclados. Así, se han comparado las flechas experimentales asociadas al momento de servicio con las obtenidas a partir de las expresiones normativas teniendo en cuenta, cuando se trata de hormigones reciclados, las correcciones propuestas para la predicción de módulo de deformación a partir de la resistencia a compresión experimental (Figura V-28).

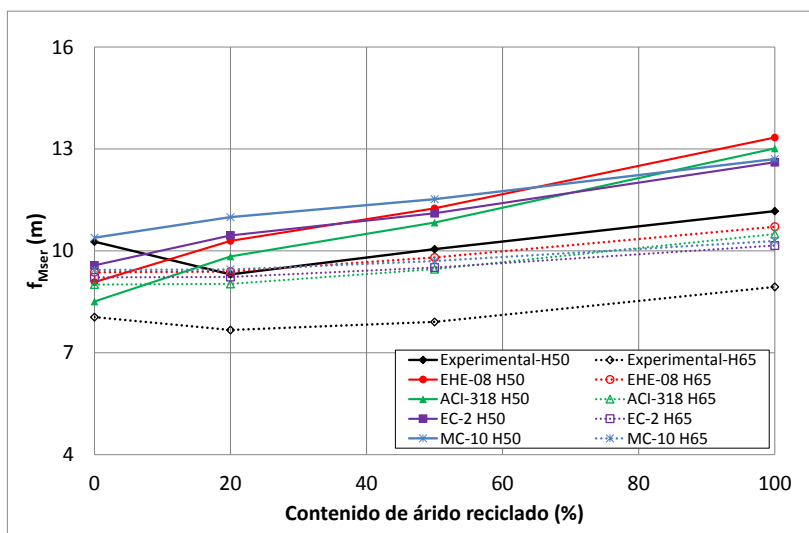


Figura V-28. Flecha de servicio. Estimación teórica y resultados experimentales

En la Tabla V-8 se presentan las correspondientes ratios “flecha teórica/ flecha experimental” de los diferentes hormigones de estudio.

	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H565-0	H65-20	H65-50	H65-100
<b>EHE-08</b>	0.88	1.11	1.12	1.19	1.16	1.22	1.24	1.20
<b>ACI-318</b>	0.83	1.06	1.08	1.17	1.12	1.18	1.20	1.17
<b>EC-2</b>	0.93	1.12	1.11	1.13	1.15	1.20	1.20	1.14
<b>MC-10</b>	1.01	1.18	1.15	1.14	1.17	1.23	1.23	1.15

Tabla V-8. Ratios " $f_{Mserv}$  teórica /  $f_{Mserv}$  experimental"

Se constata que las ratios "*flecha teórica/ flecha experimental*" de los hormigones reciclados son similares a las de los convencionales. Esto indica que para tener en cuenta la presencia de árido reciclado es innecesario introducir modificaciones en el método de cálculo de flechas propuesto en las normas. En efecto, basta con realizar los cálculos empleando las propiedades mecánicas corregidas de los hormigones reciclados (módulos de deformación) y la resistencia a compresión experimental, para obtener estimaciones de las flechas en servicio con un nivel de precisión equivalente al de los hormigones convencionales.

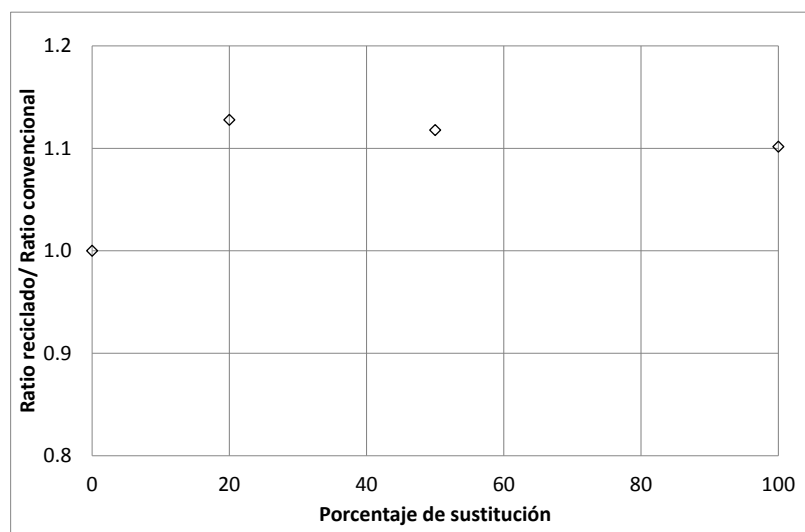


Figura V-29. Ajuste del coeficiente corrector para la predicción de la flecha asociada al momento de servicio

## 4 CONSIDERACIONES FINALES

A partir del análisis seccional, de los diagramas momento – deformación, y de las relaciones momento - curvatura, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Las deformaciones de la armadura de tracción y compresión de la sección central confirman que la rotura se ha producido por la plastificación del acero en todas las vigas. El comportamiento dúctil de las vigas se confirma, también, con la prolongación de la rama plástica observada en los diagramas momento – curvatura de todos los hormigones.
- Se han constatado curvaturas ligeramente superiores en los hormigones reciclados que en los hormigones de control, asociadas menor módulo de deformación de los primeros. Esto es especialmente notable en hormigones con el 100% de sustitución, con incrementos del 28% y del 14% para las series H50 y H65, respectivamente.

Para el análisis de solicitaciones se definieron los siguientes momentos singulares de estudio: momento de fisuración ( $M_{fis}$ ), momento de plastificación ( $M_{plast}$ ), momento máximo ( $M_{máx}$ ), momento de servicio ( $M_{serv} = 30.22$  kNm) y momento ( $M_{L350}$ ) asociado a la flecha máxima

admitida en el CTE ( $L/350$  igual en este caso a 9.71 mm). Las conclusiones alcanzadas con este análisis han sido las siguientes:

- El momento de fisuración disminuye con el porcentaje de árido reciclado empleado, en concordancia con las disminuciones de la resistencia tracción, de la que depende directamente. El  $M_{L350}$  experimenta pequeñas reducciones cuando el porcentaje de sustitución es elevado, consecuencia de la mayor deformabilidad de los hormigones reciclados de menor módulo que los convencionales. Finalmente, el dimensionamiento de las vigas para obtener roturas dúctiles supone que el hormigón tiene una contribución limitada en rotura, lo que hace que los momentos de plastificación y máximo apenas se vean afectados por la presencia de árido reciclado.
- La disminución del momento de fisuración y el mantenimiento de los de plastificación y máximo implica que en los hormigones reciclados se produce una fisuración prematura.
- A partir de las ratios "*momento experimental/ momento teórico*", similares en hormigones reciclados y convencionales, se constata que es innecesario introducir correcciones en la metodología de cálculo de momentos propuesta en las normativas para tener en cuenta la presencia de árido reciclado. Las correcciones sugeridas para las propiedades mecánicas (módulos de deformación, resistencia a tracción o deformaciones de pico y últimas) utilizadas este cálculo y el uso de la resistencia a compresión experimental, son suficientes para la correcta estimación de los momentos de referencia analizados.

Para el análisis de flechas se han utilizado, además de los diagramas momento – flecha, los siguientes valores experimentales de referencia: flecha correspondiente al momento de fisuración ( $f_{Mfis}$ ), flecha correspondiente al momento de plastificación ( $f_{Mplast}$ ), flecha correspondiente al momento máximo ( $f_{Mmáx}$ ) y flecha correspondiente al momento de servicio ( $f_{Mserv}$ ). Las conclusiones alcanzadas con este análisis han sido las siguientes:

- Las flechas aumentan, aunque muy ligeramente, para porcentajes de sustitución por encima del 20%. Como en el caso de las curvaturas, el desarrollo de las flechas guarda relación con la deformabilidad del hormigón empleado. Así, la sensible reducción del módulo cuando el porcentaje de sustitución es del 100% supone incrementos de la flecha en servicio del 11% y del 9% para las series H65 y H50, respectivamente.
- Los resultados obtenidos del análisis de las ratios "*flecha teórica/ flecha experimental*" indican, una vez más, que para tener en cuenta la presencia de árido reciclado es innecesario introducir correcciones en el método de cálculo de flechas propuesto en las normativas. De nuevo, las correcciones sugeridas para las propiedades mecánicas utilizadas en el cálculo de las mismas (módulos de deformación) y el uso de la resistencia a compresión experimental, son suficientes para su correcta estimación en hormigones reciclados.

---

# VI. FLEXIÓN BAJO CARGA SOSTENIDA

---

## 1 INTRODUCCIÓN

La respuesta estructural a flexión de los hormigones reciclados bajo carga sostenida se analizó mediante el ensayo de vigas idénticas a las empleadas para el estudio de comportamiento bajo cargas incrementales. Se trabajó con dos series de vigas de hormigón de diferentes propiedades. En la serie H50 se utilizó el hormigón de relación agua/cemento 0.50, orientado a la clase de exposición IIIa, y en la H65 de 0.65, válido para la clase de exposición no agresiva definida por el ambiente I. El diferente tipo de ambiente ha condicionado, entre otros parámetros, el recubrimiento de hormigón en las vigas, que fue de 20 mm en la serie H50 y de 35 mm en la H65. Como en el caso de los ensayos bajo cargas incrementales (*Capítulo V*), la diferencia de canto útil impide la comparación del comportamiento estructural entre ambas series en términos de propiedades del hormigón, ya que la mayor deformabilidad esperada en las vigas de la serie H65, con hormigón de menor módulo que el de la serie H50, se ve mitigada por el incremento en su canto útil.

Para el estudio bajo carga sostenida el ensayo se inició a 42 días ( $t_0$ ) con la aplicación de la carga de diseño mediante un sistema elemental de palanca, y se prolongó durante 1000 días ( $t-t_0 = 1000$  días). El proceso de carga y el esquema de ensayo empleados se han descrito de forma detallada en el *Capítulo III* de este documento. Para el desarrollo de los ensayos se instrumentaron con galgas extensométricas y transductores de desplazamiento cada una de las vigas de estudio, de forma que se registrasen las deformaciones instantáneas y diferidas. Paralelamente a estos ensayos se llevaron a cabo ensayos de compresión simple sobre probeta cilíndrica que permitieron el análisis de la fluencia recogido en el *Capítulo IV*.

En el análisis del comportamiento bajo carga sostenida se han diferenciado dos etapas de ensayo. La primera corresponde al proceso de puesta en carga, registrándose medidas de deformaciones y flechas de forma continua hasta que se alcanza la carga de diseño en el instante de tiempo  $t_0$  (lo que define la carga de servicio y las deformaciones y flechas instantáneas). La segunda atañe al estado de carga sostenida, en la que se realiza el análisis del comportamiento diferido en el tiempo ( $t-t_0$ ), registrándose medidas de las deformaciones y flechas de manera intermitente durante 1000 días.

Tal como se ha explicado en el *Capítulo III*, la carga introducida pretendía alcanzar una tensión del 30% de  $f_c$  en la fibra más comprimida de la sección central de la viga (rango de fluencia



lineal) y en las probetas situadas bajo la losa de carga. Sin embargo, las pérdidas de carga por rozamiento que desarrolló el sistema de poleas para carga de las probetas de fluencia y las variables tolerancias que el sistema de palanca presentaba introdujeron desviaciones respecto a la tensión objetivo.

Los valores reales de la deformación instantánea alcanzada tras la introducción de la carga y el valor del módulo de elasticidad obtenido el día de carga permiten determinar el estado tensional real correspondiente al instante de carga,  $t_0=42$  días, en las probetas y en la fibra más comprimida de las vigas (Tabla VI-1). Dichas tensiones se corroboraron, también, con los valores registrados en ambas células de carga. En ningún caso, la tensión sobrepasó el límite del rango de fluencia lineal del hormigón ( $< 40\%f_c$ ). [MC-10, EHE-08].

	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H65-0	H65-20	H65-50	H65-100
$\sigma_{0,vigas}$ (MPa)	21.92	16.14	14.08	14.79	14.19	13.43	10.34	9.80
$\sigma_{0,vigas} / f_c$	33%	27%	27%	34%	28%	29%	25%	30%
$\sigma_{0,prob.}$ (MPa)	22.42	15.60	14.60	15.22	14.80	15.75	11.00	12.63
$\sigma_{0,probetas} / f_c$	34%	26%	28%	36%	29%	33%	26%	39%

Tabla VI-1. Nivel tensional y tensión en la fibra más comprimida de las vigas y en las probetas

## 2 NOMENCLATURA DE LA INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación de las vigas estaba constituida por galgas extensométricas, células de carga y transductores de desplazamiento, que registraron durante el ensayo las deformaciones, cargas y flechas, respectivamente.

La descripción exhaustiva de la instrumentación empleada durante el desarrollo de los ensayos se encuentra detallada en el Capítulo III. Se presentan dos esquemas (Tabla VI-2 y Tabla VI-3) en los que se resume la empleada específicamente para el desarrollo de esta fase experimental.

EE2	EE1	EW2	EW1	IE143	IE178	IE213	IW143	IW178	IW213	SE143	SE178	SE213	SW143	SW178	SW213
Estribos (E): este (E) - oeste (W)				Armadura inferior (I) de tracción: este (E) - oeste (W)						Armadura superior (S) compresión: este (E) - oeste (W)					
<p>Diagrama de instrumentación en la armadura de las vigas. Muestra dos secciones de una viga con armadura superior y inferior. Las etiquetas indican la posición de los sensores:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>EE1, EE2: Sensores en los estribos.</li><li>EW1, EW2: Sensores en la armadura inferior de tracción.</li><li>IE143, IE178, IE213: Sensores en la armadura inferior de tracción.</li><li>IW143, IW178, IW213: Sensores en la armadura superior de compresión.</li><li>SE143, SE178, SE213: Sensores en la armadura superior de compresión.</li><li>SW143, SW178, SW213: Sensores en la armadura superior de compresión.</li></ul>															

Tabla VI-2. Instrumentación en la armadura de las vigas

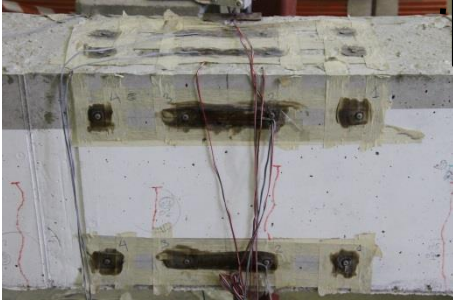

HES	HWS	HEI	HWI	HWC	HEC	V1S	V2S	V1I	V2I
Galgas sobre hormigón (H) en la sección central, caras este (E) y oeste (W), superior (S) e inferior (I)				Galgas sobre hormigón (H) en la sección central, caras este (E), oeste (W) y cabeza de compresión (C)		Galgas verticales sobre probetas de fluencia en las generatrices 1 y 2 de la probeta superior (S) e inferior (I)			
									

Tabla VI-3. Instrumentación en el hormigón y en las probetas de fluencia (galgas)

Para el control de la carga se utilizaron dos células de carga, una situada en la parte superior del bastidor que alojaba las probetas de fluencia y la otra en la parte superior del tirante de tracción (*Figura VI-1*).

Por último, en la sección central de la viga, se colocó un transductor de desplazamiento, montado sobre un trípode, que permitió registrar las flechas instantáneas y diferidas durante todo el periodo de ensayo (*Figura VI-2*).



Figura VI-1. Células de carga superior (tirante) e inferior (bastidor)



Figura VI-2. Transductor de desplazamiento en la sección central de la viga

### 3 COMPORTAMIENTO BAJO CARGA SOSTENIDA

Como en el proceso de cargas incrementales, a partir de los resultados obtenidos se realizó un análisis seccional utilizando las curvas momento – deformación (las deformaciones representadas corresponden a las obtenidas por la instrumentación en diversas secciones), y las relaciones momento - curvatura, calculándose éstas a partir de las deformaciones en las armaduras longitudinales superior e inferior.

Durante el proceso de carga se realizó un análisis de solicitaciones, para el que se definieron como momentos singulares de estudio el de fisuración,  $M_{fis}$ , y el correspondiente a la carga aplicada,  $M_Q$ . También se estudió la progresión de flechas, utilizándose como valores de referencia los asociados a las solicitaciones anteriores: flecha de fisuración  $f_{M_{fis}}$  y flecha asociada al momento correspondiente a la carga aplicada  $f_{M_Q}$ . Estas se definieron como flechas instantáneas.

Tras el proceso de puesta en carga en la primera etapa, las vigas se mantuvieron bajo carga sostenida durante los 1000 días de la segunda etapa ( $t-t_0$ ). El análisis diferido de las deformaciones y flechas desarrolladas durante este periodo se realizó a través de medidas intermitentes de la carga, de la flecha y de las deformaciones.

#### 3.1 Análisis seccional

##### 3.1.1 Deformaciones

Las deformaciones registradas por las galgas del hormigón y acero de ambas caras (*este y oeste*) presentan una gran similitud en todas las vigas, lo que garantiza la ausencia de esfuerzos torsores que habrían distorsionado los ensayos. Las deformaciones de la armadura de compresión y de tracción de las secciones 143 y 213, así como de la sección central 178 en la que, además, aparece la deformación del hormigón (superior, inferior y cabeza de compresión), permiten obtener las curvas momento –deformación que se muestran de la *Figura VI-3* a la *Figura VI-6*. La comparación de las deformaciones registradas por las galgas de acero y hormigón situadas en la misma fibra de la misma sección de la viga, permite comprobar la compatibilidad de deformaciones entre ambos materiales.

##### 3.1.2 Diagrama momento - curvatura

A partir de las deformaciones registradas en la armadura longitudinal, en la sección central de las vigas, se obtuvieron los diagramas M-C para cada uno de los hormigones de estudio hasta 1000 días a fin de conocer el estado de las vigas durante el ensayo (*Figura VI-7* y *Figura VI-8*).

A diferencia del ensayo bajo cargas incrementales, la carga se aplicó mediante un peso muerto que a través de un sistema elemental de palanca generó por gravedad un vano central de flexión constante donde se realizó el estudio a largo plazo. Este sistema hace que la velocidad de carga y el nivel tensional alcanzado sea algo distinto entre las diferentes vigas de ensayo. Por esta causa es difícil apreciar diferencias significativas entre los hormigones reciclados y convencionales en el proceso de carga de la serie H65.

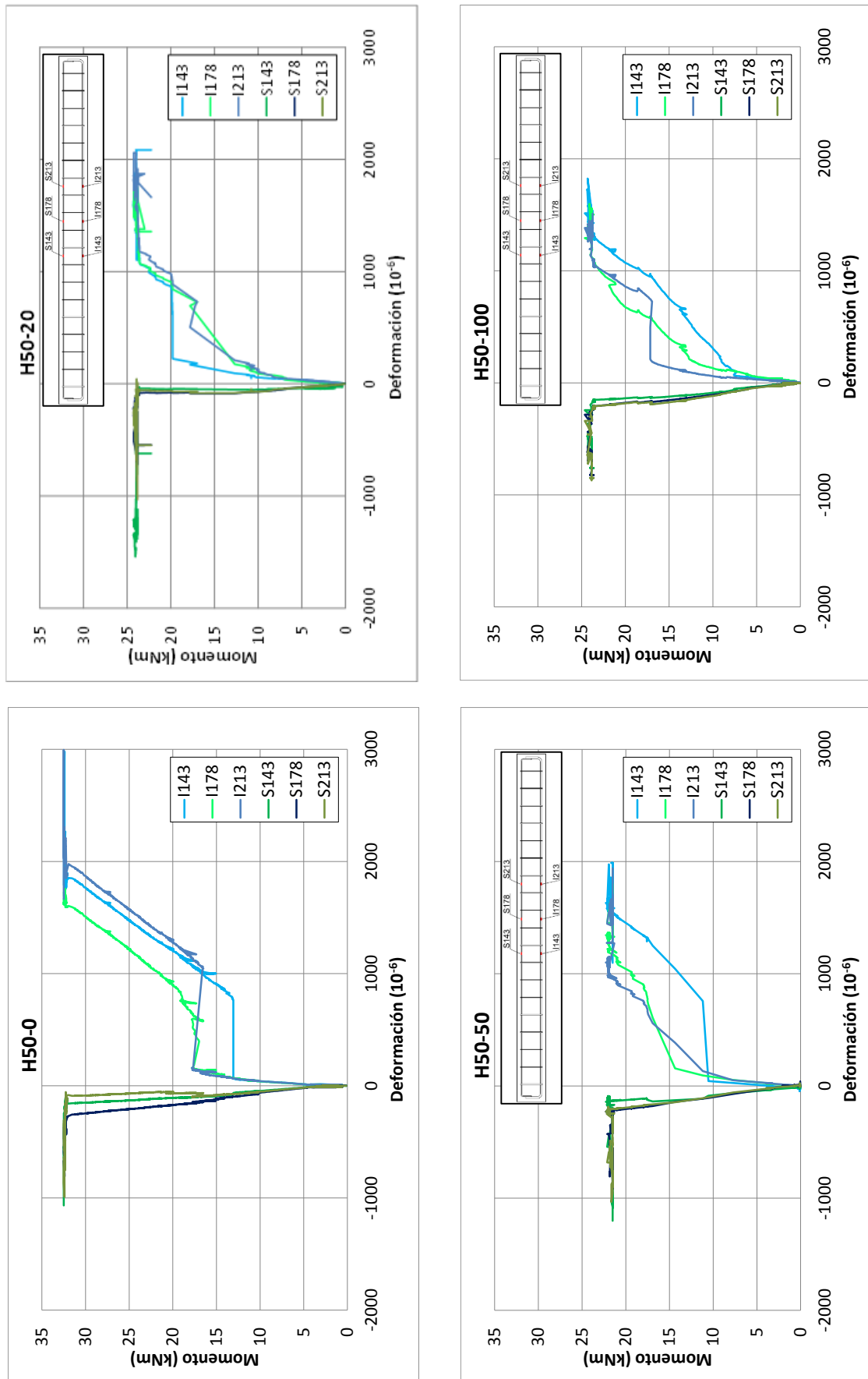


Figura VI-3. Deformación en la armadura bajo carga sostenida. H50

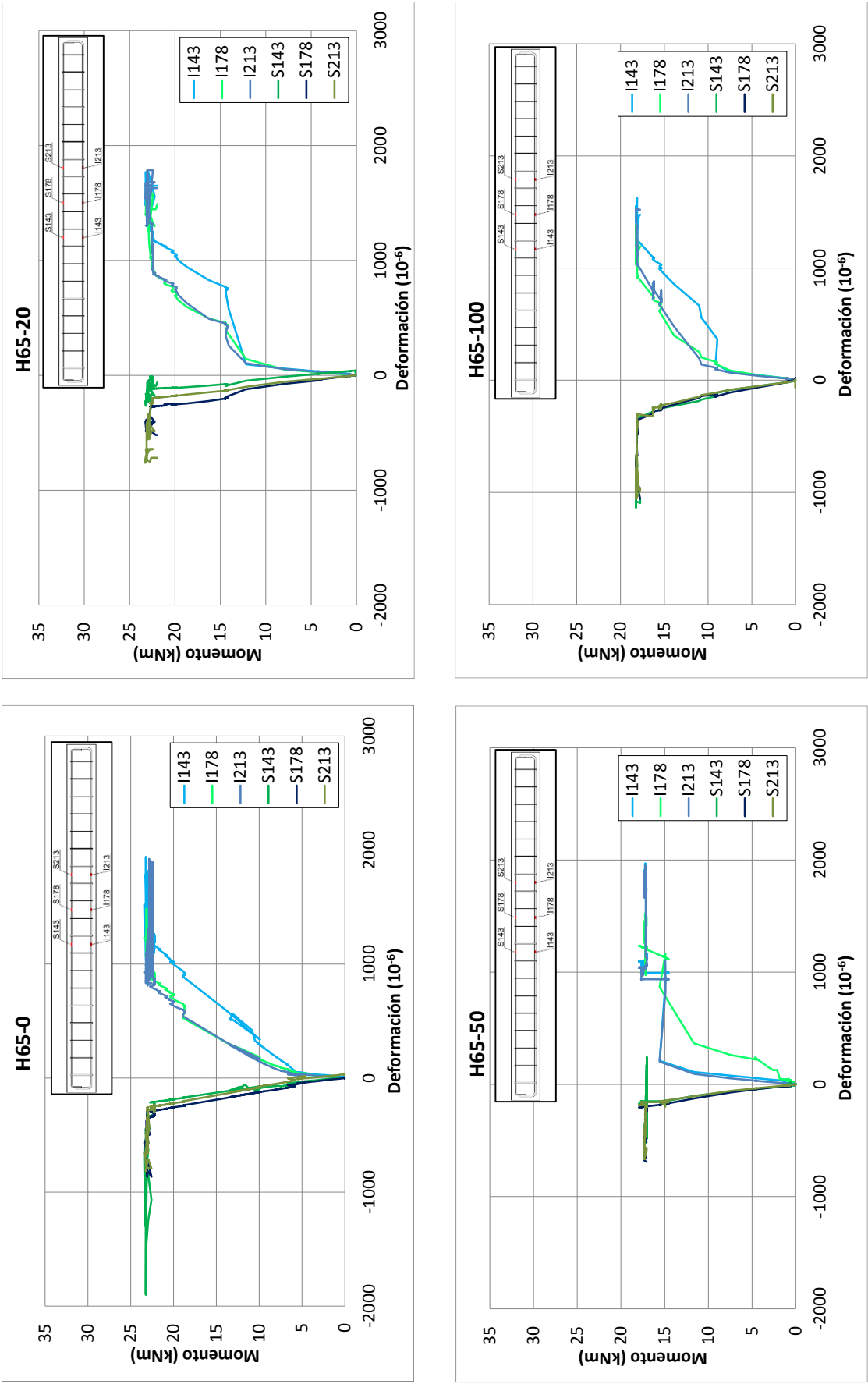


Figura VI-4. Deformación en la armadura bajo carga sostenida. H65

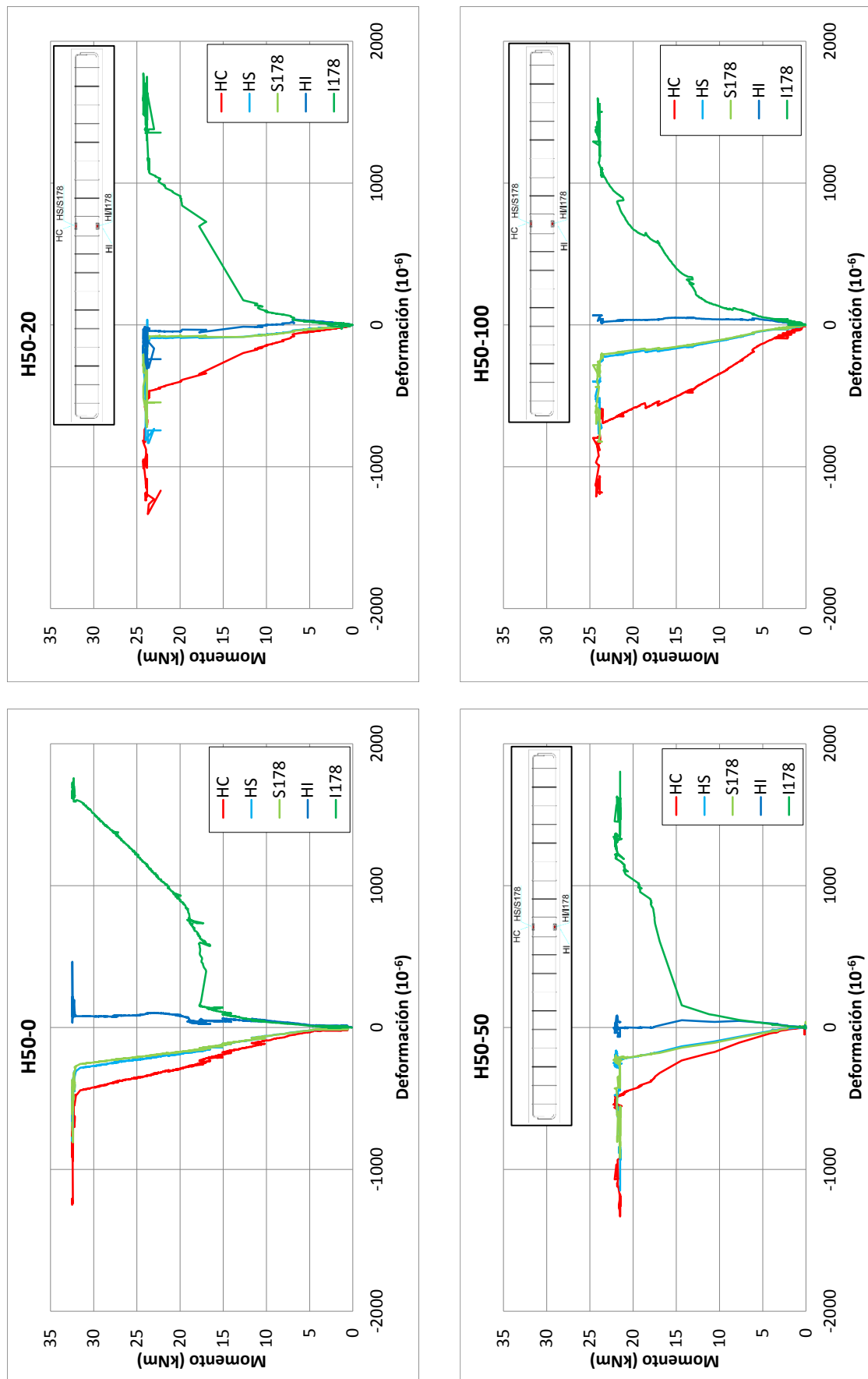


Figura VI-5. Deformación en la sección central, hormigón y acero, bajo carga sostenida. H50

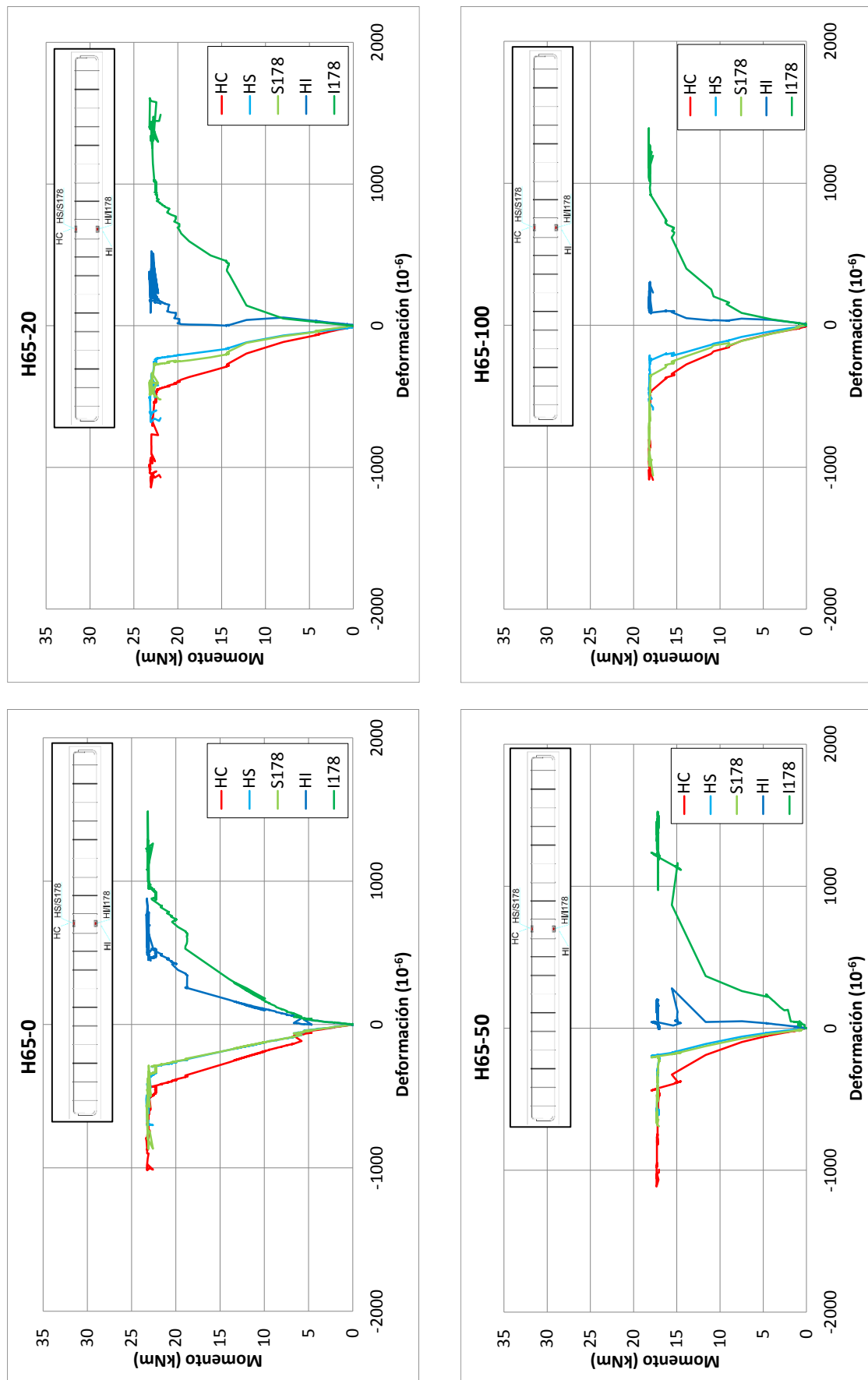


Figura VI-6. Deformación en la sección central, hormigón y acero, bajo carga sostenida. H65

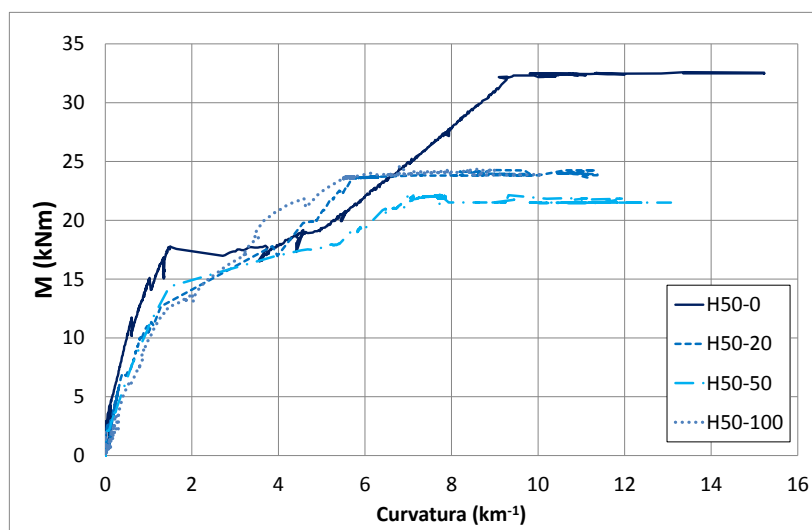


Figura VI-7. Diagramas M-C en la sección central bajo carga sostenida. H50

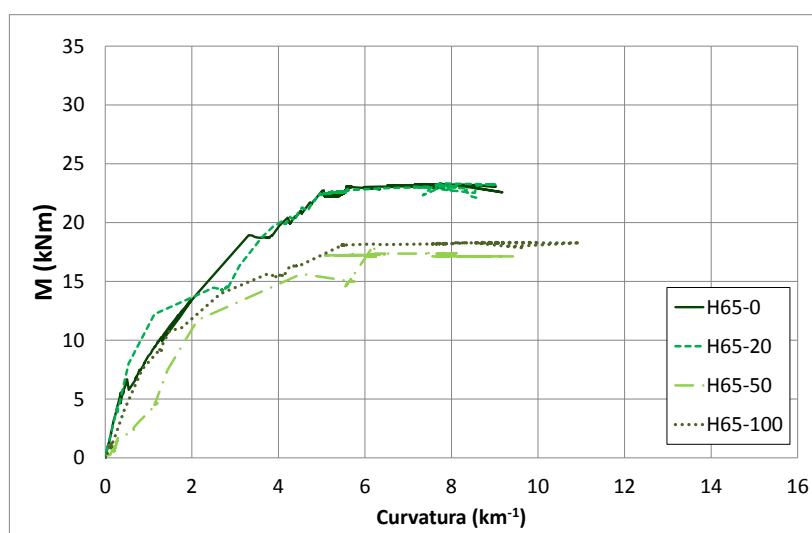


Figura VI-8 Diagramas M-C en la sección central bajo carga sostenida. H65

### 3.2 Análisis de solicitaciones

Al igual que en el estudio a flexión bajo cargas incrementales, se obtienen los valores experimentales de los momentos flectores más característicos. Tras la aplicación de la carga todas las vigas fisuran y se encuentran en fase II, bajo momentos próximos al de servicio. El momento de fisuración ( $M_{fis}$ ) y el correspondiente a la carga aplicada ( $M_Q$ ) se recogen en la *Tabla VI-4*.

kNm	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H65-0	H65-20	H65-50	H65-100
$M_{fis}$	17.78	12.68	14.37	12.75	13.97	12.22	11.71	9.28
$M_Q$	31.55	23.94	21.88	23.11	23.03	23.00	17.13	18.10

Tabla VI-4. Momentos de fisuración,  $M_{fis}$ , y correspondiente a la carga aplicada,  $M_Q$ 

Los resultados indican, en concordancia con los obtenidos en los ensayos bajo cargas incrementales, que el momento de fisuración disminuye significativamente al aumentar el porcentaje de árido reciclado empleado. Respecto a sus hormigones de control, en los hormigones con el 20%, 50% y 100% de árido reciclado los momentos de fisuración se



reducen, respectivamente, un 28, 19 y 28% en la serie H50 y un 10, 13 y 26% en la serie H65. Estos porcentajes de reducción resultan muy similares a los obtenidos en la Fase Vigas I, obteniéndose, como era de esperar, momentos de fisuración a 42 días (Fase Vigas II) superiores a los de 28 días (Fase Vigas I), en coherencia con los incrementos de la resistencia a tracción (Figura VI-9).

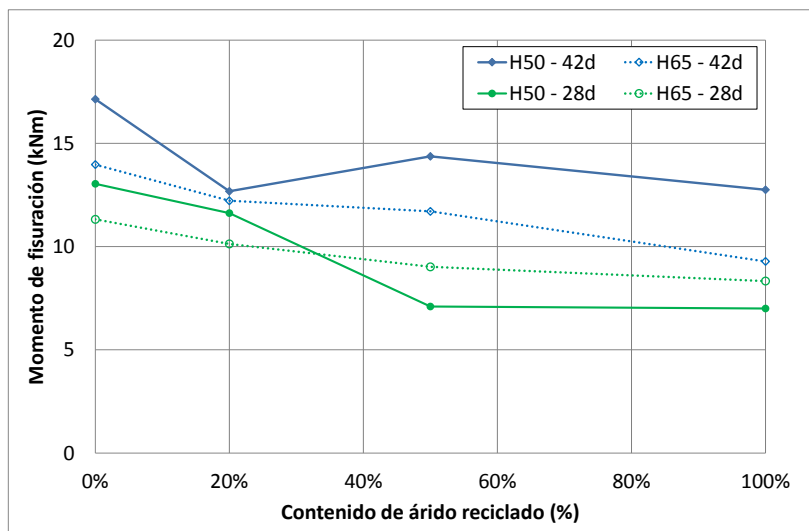


Figura VI-9. Momentos de fisuración a 28 y 42 días

## 3.3 Análisis de deformaciones

### 3.3.1 Deformación total

La Figura VI-10 y la Figura VI-11 muestran los diagramas deformación–tiempo obtenidos a partir de las galgas de hormigón situadas en la fibra más comprimida de la sección central de la viga (en la cabeza de compresión, HC), para ambas series. En ellas se recogen las deformaciones totales, suma de las instantáneas y diferidas.

La Tabla VI-5 resume los principales parámetros de ensayo (valores de tensión y nivel tensional alcanzado en la fibra más comprimida de la sección central de la viga), así como los principales resultados obtenidos tras 1000 días de carga (deformación total, instantánea y diferida).

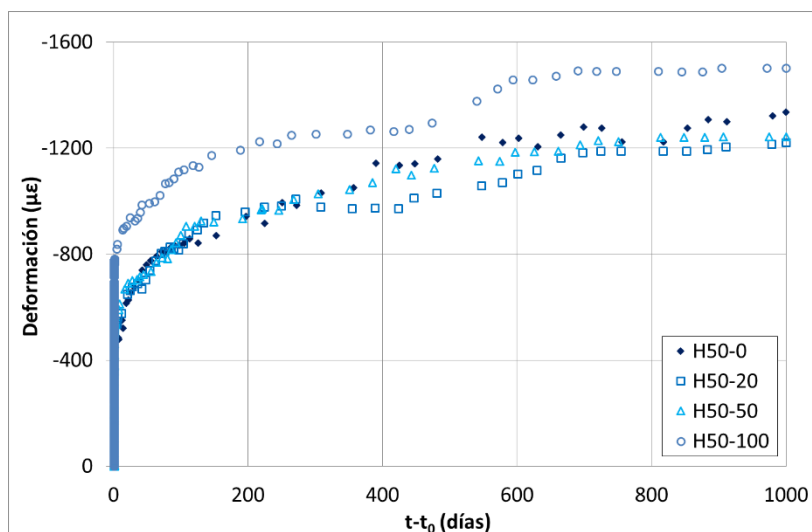


Figura VI-10. Deformación total– tiempo. H50

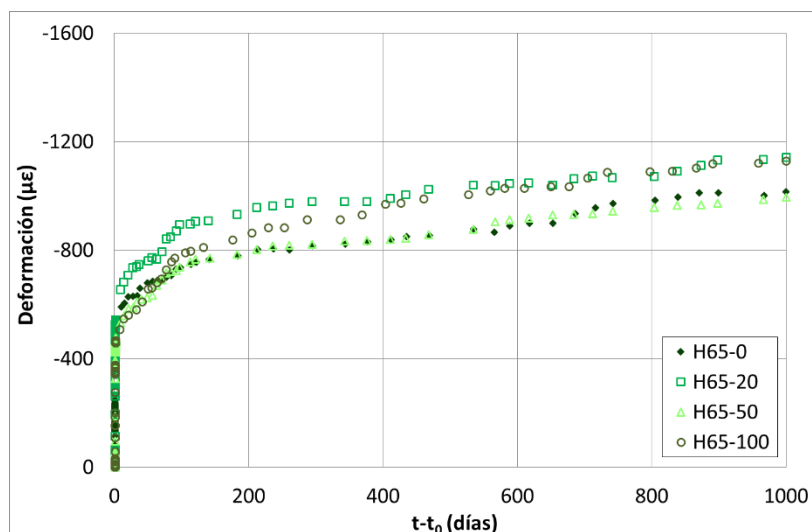


Figura VI-11. Deformación total – tiempo.H65

	$\epsilon_c$ (1000 días) ( $\mu\epsilon$ )	$\epsilon_{co}$ ( $\mu\epsilon$ )	$\epsilon_{cdif}$ ( $\mu\epsilon$ )	$\sigma_0$ (MPa)	$\sigma/f_c$
<b>H50-0</b>	-1334.99	-442.10	-892.89	21.92	33%
<b>H50-20</b>	-1219.45	-465.21	-754.24	16.09	27%
<b>H50-50</b>	-1242.06	-471.86	-770.20	14.15	27%
<b>H50-100</b>	-1500.91	-691.32	-809.59	14.79	36%
<b>H65-0</b>	-1016.03	-433.19	-582.84	14.19	28%
<b>H65-20</b>	-1142.22	-433.57	-708.66	13.43	29%
<b>H65-50</b>	-995.79	-326.92	-668.87	10.34	25%
<b>H65-100</b>	-1128.86	-375.47	-753.39	9.80	30%

Tabla VI-5. Deformación total, instantánea y diferida a 1000 días. Tensión y nivel tensional bajo carga sostenida.

### 3.3.2 Deformaciones diferidas y deformaciones diferidas unitarias

La *Figura VI-14* muestra las deformaciones diferidas de ambas series obtenidas por diferencia entre la deformación total y la instantánea. De los resultados obtenidos se constata que en los 200 primeros días de carga se desarrollan la mayor parte de las deformaciones, tanto en hormigones reciclados como convencionales, tendiendo a estabilizarse a partir de ese momento.

Sin embargo, el diferente nivel de carga aplicado a cada hormigón dificulta la comparación de la deformación diferida desarrollada en los hormigones estudiados, impidiendo determinar si las diferencias que se observan se deben únicamente al contenido de árido reciclado con que fueron fabricados.

Por ello, al igual que en el estudio de fluencia sobre probetas (*Capítulo IV*), se opta por la normalización de las medidas a través del concepto de deformación diferida unitaria, calculada como la relación entre la deformación diferida y la tensión aplicada.

El análisis de la deformación diferida normalizada revela una significativa influencia del contenido de árido reciclado sobre el comportamiento de los hormigones estudiados (*Figura VI-14*). Respecto a los hormigones patrón, en la serie H50 a 1000 días se constatan incrementos en la deformación diferida unitaria del 15% cuando los porcentajes de sustitución son del 20%, y del 34% si se reemplaza el 50-100% del árido grueso por reciclado. En la serie H65 los incrementos son del 28, 57 y 87% para el H65-20, H65-50 y H65-100,

respectivamente. De nuevo, se constata una mayor influencia del árido reciclado en los hormigones H50 (de resistencias más altas) que en los H65 de mayor relación a/c.

En la *Figura VI-12* y la *Figura VI-13* se comparan las deformaciones diferidas unitarias obtenidas en la fibra más comprimida de la sección central de las vigas con las obtenidas en las probetas de fluencia para cada tipo de hormigón. Los resultados permiten observar cómo la presencia de armadura en las vigas coacciona la libre deformación del hormigón, lo que supone el desarrollo de menores deformaciones que las alcanzadas en las probetas.

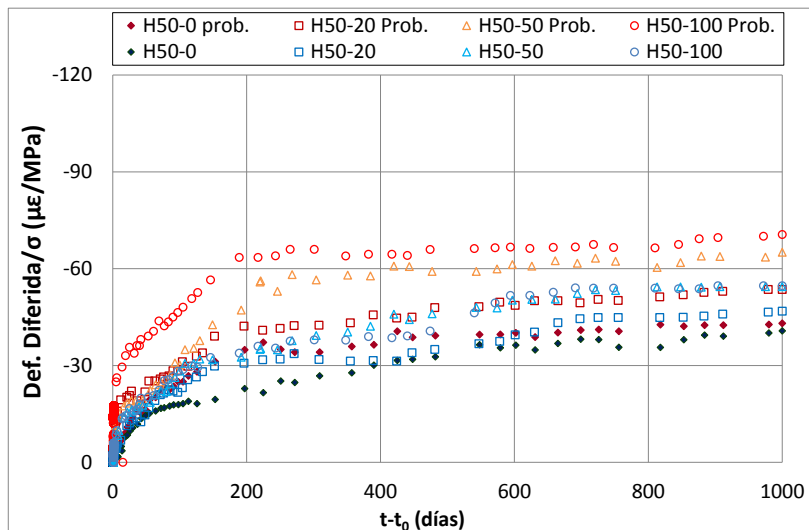


Figura VI-12. Deformación diferida unitaria – tiempo en probetas y cabeza de compresión de la viga. H50

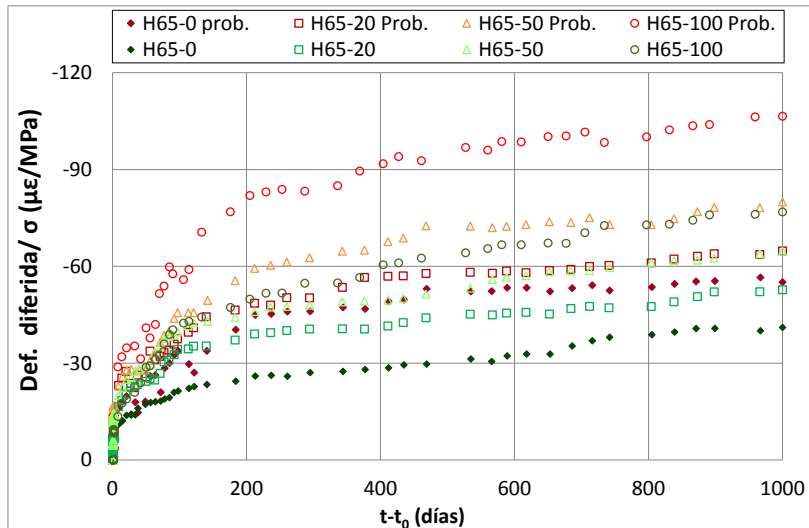


Figura VI-13. Deformación diferida unitaria – tiempo en probetas y cabeza de compresión de la viga. H65

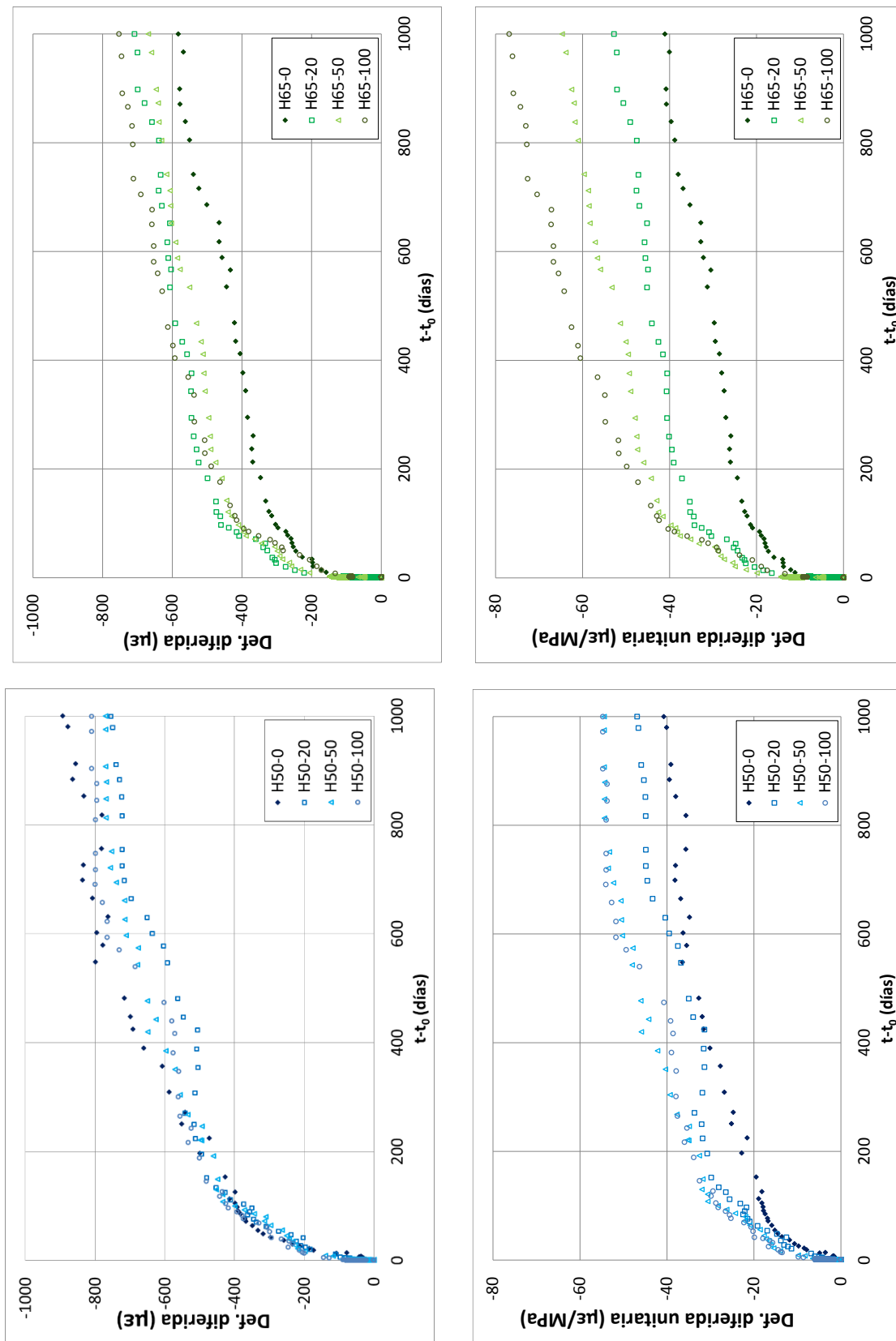


Figura VI-14. Deformación diferida – tiempo y diferida unitaria – tiempo

### 3.4 Análisis de flechas

#### 3.4.1 Flechas totales

La *Figura VI-15* y la *Figura VI-16* muestran los diagramas flecha–tiempo obtenidos a partir del transductor de desplazamiento situado en la sección central de la viga, para ambas series H50 y H65. En ellas se recogen las flechas totales, suma de las instantáneas y diferidas. Además, se resumen en la *Tabla VI-6* los principales resultados obtenidos tras 1000 días de carga y los parámetros de ensayo.

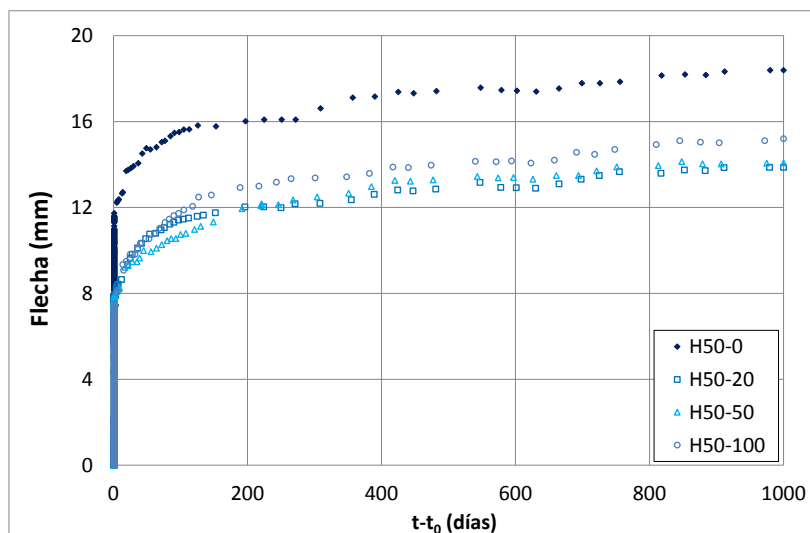


Figura VI-15. Flecha total - tiempo. H50

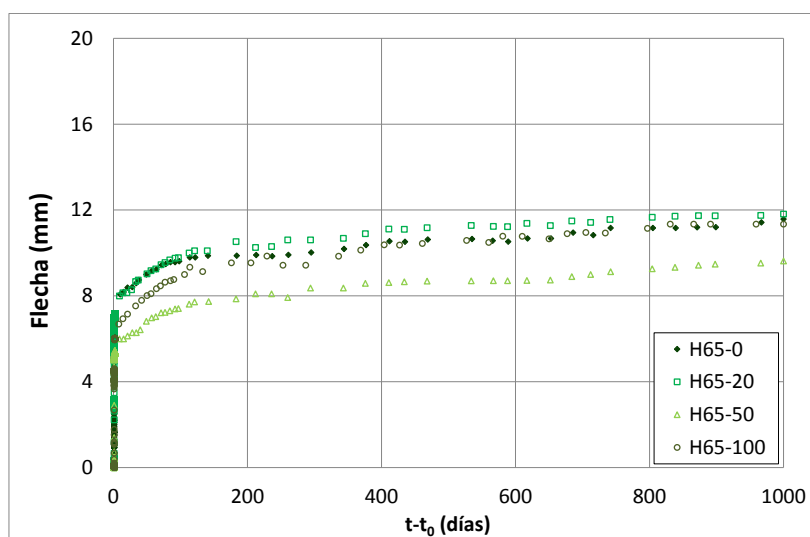


Figura VI-16. Flecha total - tiempo. H65

La *Figura VI-17* y la *Figura VI-18* muestran los diagramas momento–flecha en la sección central de la viga que, al igual que los obtenidos en el análisis bajo cargas incrementales, indican un tenue incremento de la flecha desarrollada por hormigones con porcentajes de sustitución por encima del 20%. Los valores de la flecha asociada al momento de fisuración ( $f_{Mfis}$ ) y desarrollada bajo el momento correspondiente a la carga introducida ( $f_{MQ}$ ), se muestran en la *Tabla VI-7*.

	$f_{(1000 \text{ días})} \text{ (mm)}$	$f_o \text{ (mm)}$	$f_{dif} \text{ (mm)}$	$M_Q \text{ (kNm)}$
<b>H50-0</b>	18.39	11.73	6.66	31.55
<b>H50-20</b>	13.87	7.90	5.97	23.94
<b>H50-50</b>	14.08	7.87	6.21	21.88
<b>H50-100</b>	15.20	6.80	8.40	23.11
<b>H65-0</b>	11.58	6.71	4.87	23.03
<b>H65-20</b>	11.81	5.95	5.86	23.00
<b>H65-50</b>	9.63	4.96	4.67	17.13
<b>H65-100</b>	11.34	4.59	6.75	18.10

Tabla VI-6. Flecha total, instantánea y diferida a 1000 días y momento asociado a la carga sostenida

	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H65-0	H65-20	H65-50	H65-100
$f_{M_{fis}}$	1.74	1.57	1.22	1.20	1.92	1.59	1.40	1.08
$f_{M_Q}$	11.73	7.90	7.87	6.80	6.71	5.95	4.96	4.59

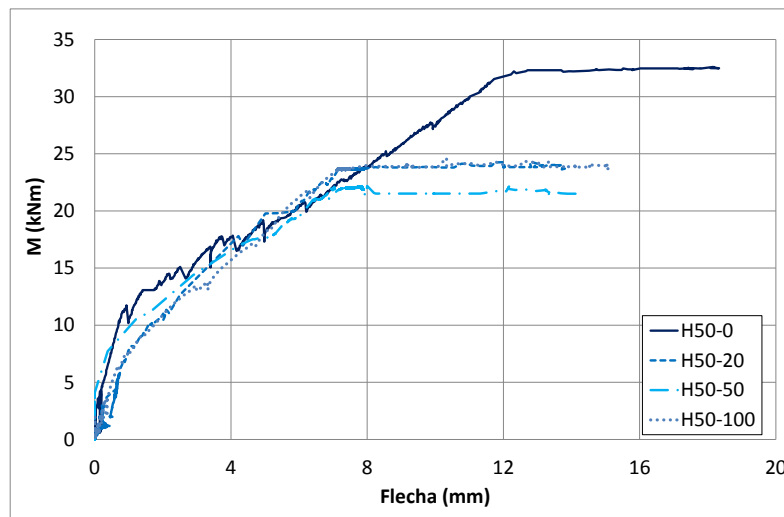
Tabla VI-7. Flechas asociadas los momentos  $M_{fis}$ ,  $M_Q$ , (mm)

Figura VI-17. Diagrama momento – flecha. H50

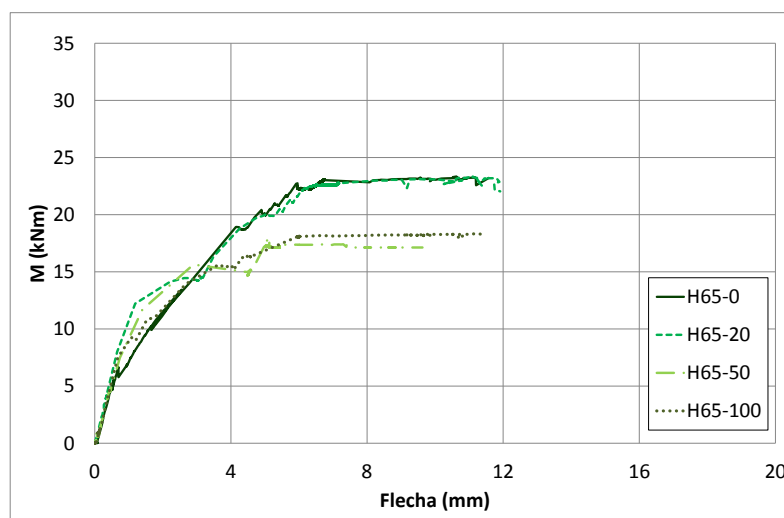


Figura VI-18. Diagrama momento – flecha. H65

### 3.4.2 Flechas diferidas y flechas diferidas unitarias

La *Figura VI-21* muestra las flechas diferidas de ambas series, H50 y H65, obtenidas por diferencia entre la flecha total y la instantánea. De los resultados obtenidos se constata que, como en las deformaciones, en los 200 primeros días de carga se desarrollan la mayor parte de las flechas, tanto en hormigones reciclados como convencionales, tendiendo a estabilizarse a partir de ese momento.

De nuevo, el diferente nivel de carga aplicado a cada hormigón dificulta la comparación de la flecha diferida desarrollada en los hormigones estudiados, impidiendo determinar si las diferencias que se observan se deben al contenido de árido reciclado con que fueron fabricados o al diferente nivel de carga aplicada.

Al igual que en el estudio de deformaciones, se opta por analizar las medidas a través del concepto de flecha diferida unitaria, obtenida en este caso, como la relación entre la flecha diferida experimental y el momento flector en la sección central de la viga. Así, el análisis de los valores de la flecha unitaria revela una significativa influencia del contenido de árido reciclado sobre el comportamiento de los hormigones estudiados (*Figura VI-21*). Respecto a los hormigones patrón de la serie H65, a 1000 días se constatan incrementos en la flecha diferida unitaria del 21%, 29% y 76% para sustituciones del 20%, 50% y 100% respectivamente. En la serie H50 el incremento medido es del 18%, 34% y 72% respectivamente para los mismos porcentajes de sustitución. Se observa, también que, al igual que con las deformaciones unitarias, la flecha diferida unitaria aumenta en los hormigones reciclados de mayor relación a/c (H65 frente a H50).

Analizando la relación entre la flecha diferida y la instantánea en el tiempo para los distintos hormigones de estudio, se observa que los hormigones reciclados desarrollan mayores flechas diferidas que los convencionales (*Figura VI-19* y *Figura VI-20*).

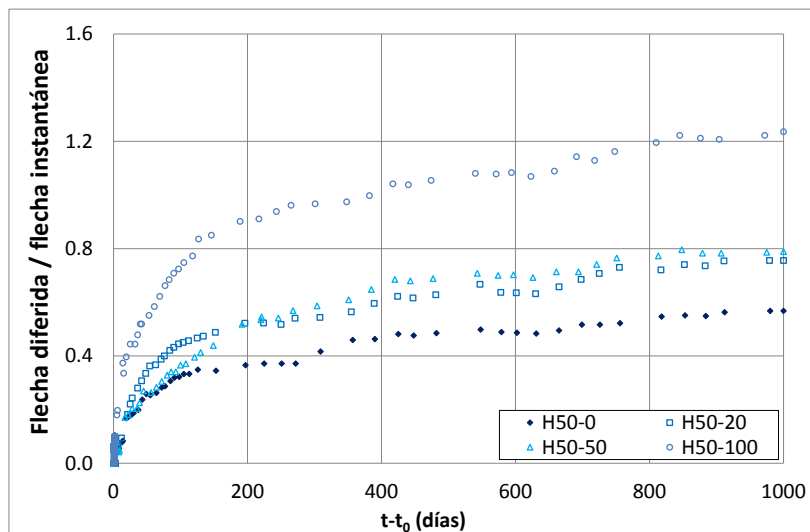


Figura VI-19. Relación "flecha diferida/ flecha instantánea" - tiempo. H50

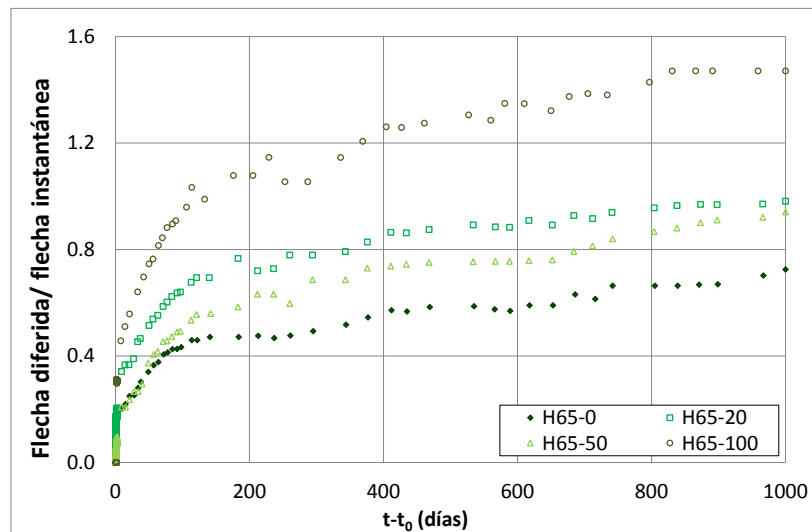


Figura VI-20. Relación “flecha diferida/ flecha instantánea” - tiempo. H65

Así, con los hormigones convencionales, H50-0 y H65-0, se obtienen relaciones “*flecha diferida/ flecha instantánea*” a 1000 días de valor 0.6 y 0.7, respectivamente. Sin embargo, los hormigones reciclados de la serie H50 desarrollaron una flecha diferida a 1000 días de entre 0.8 y 1.2 veces la instantánea (correspondiente a porcentajes de árido reciclado de entre 20% y 100%) y los de la serie H65 de entre 0.9 y 1.5 (para el mismo rango de sustitución). Se constata de esta forma que la flecha diferida de los hormigones reciclados es mayor a la de los convencionales de la misma dosificación y aumenta al crecer el porcentaje de árido reciclado empleado.



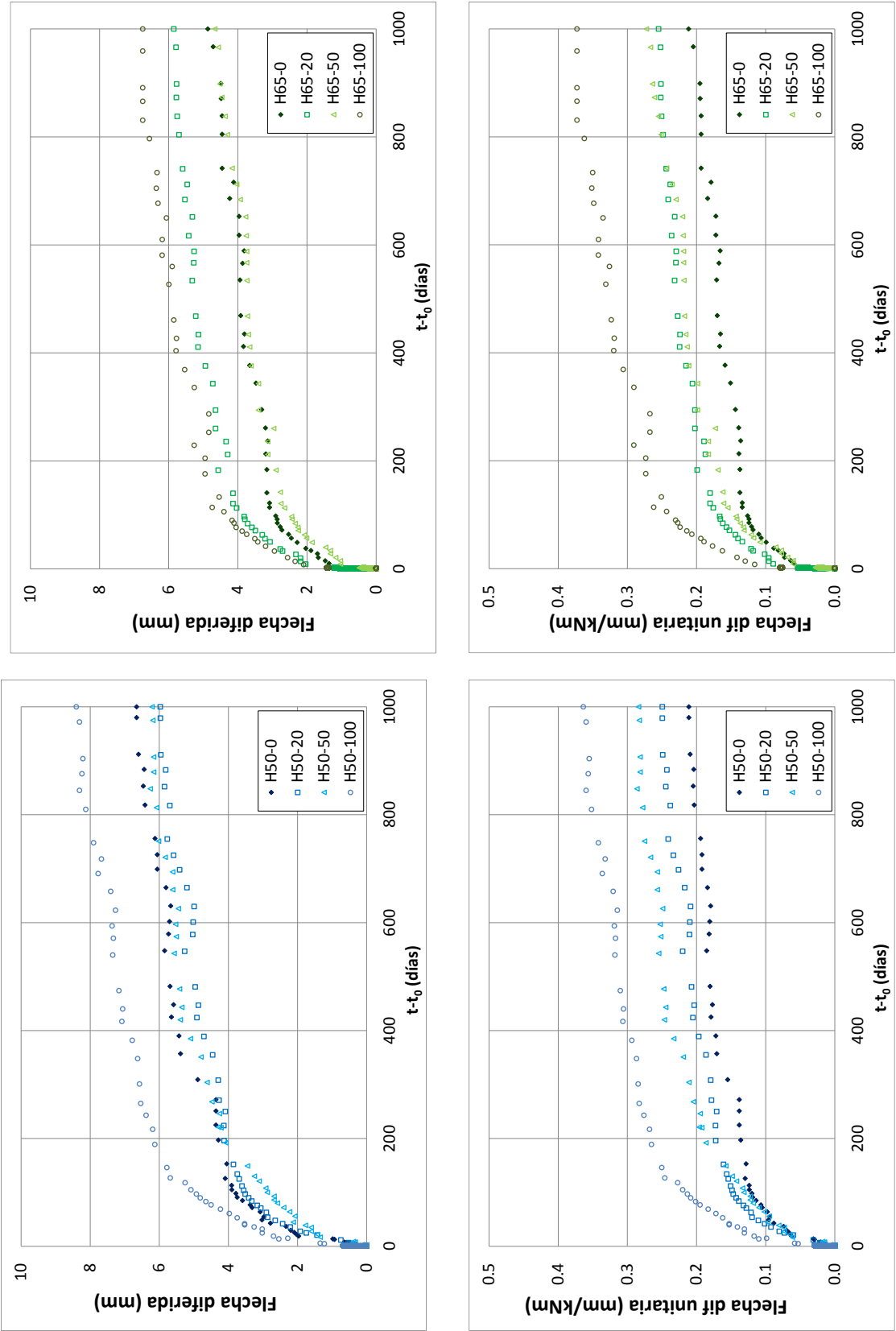


Figura VI-21. Flecha diferida –tiempo y flecha diferida unitaria - tiempo

### 3.4.3 Estimación de la flecha diferida

Al igual que con otras propiedades del hormigón, se evalúa la bondad de las propuestas normativas para la predicción de la flecha diferida cuando se utilizan hormigones reciclados. Se han comparado las flechas diferidas experimentales con las obtenidas a partir de las expresiones normativas [EHE-08; ACI318; EC-2; MC-10] y la propuesta realizada por Marí et al. [MARÍ10] a partir de 60 días de carga.

La *Figura VI-22* y la *Figura VI-23* muestran los valores de flecha experimental y teórica a distintas edades para los hormigones de estudio. El cálculo de las flechas diferidas teóricas se realiza de forma diferente según las expresiones de cálculo que se consideren. Por un lado, las estimaciones de la norma española [EHE-08] y americana [ACI318] calculan la flecha diferida multiplicando la instantánea por un coeficiente que depende únicamente de la edad del hormigón y la cuantía de armadura a compresión. Por otra parte, las demás expresiones analizadas [MARÍ10; EC-2; MC-10] calculan la flecha diferida como suma de las de fluencia y retracción. Para ello se tienen en cuenta la deformación de retracción y el coeficiente de fluencia obtenidos teóricamente con las correcciones propuestas en el *Capítulo IV* para hormigones con distintos porcentajes de sustitución de árido grueso natural por reciclado.

En la *Tabla VI-8* se resumen las ratios “*flecha diferida experimental/ flecha diferida teórica*” correspondientes a 1000 días de carga. Los resultados permiten observar las ratios obtenidas para hormigones reciclados son superiores a las de los hormigones convencionales, aunque no dependen del porcentaje de árido reciclado empleado. Además, el valor de las mismas es diferente según se opte por las estimaciones de la norma española [EHE-08] y americana [ACI318] o por las de demás expresiones analizadas [MARÍ10; EC-2; MC-10].

Así, para conseguir el mismo nivel de precisión entre los hormigones convencionales y los reciclados manteniendo las ratios “*flecha diferida experimental/ flecha diferida teórica*” de los hormigones de estudio deberá ajustarse un coeficiente corrector para la estimación de las flechas diferidas.

	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H65-0	H65-20	H65-50	H65-100
<b>EHE-08</b>	0.85	1.10	1.16	1.09	1.04	1.10	1.24	1.22
<b>ACI318</b>	0.84	1.09	1.13	1.05	1.01	1.07	1.24	1.16
<b>EC-2</b>	0.66	0.69	0.72	0.69	0.59	0.69	0.67	0.73
<b>MC-10</b>	0.76	0.67	0.65	0.59	0.51	0.62	0.54	0.55
<b>Marí et al.</b>	1.50	1.32	1.28	1.32	1.20	1.39	0.99	1.24

Tabla VI-8. Ratios “*flecha diferida experimental/ flecha diferida teórica*” a 1000 días

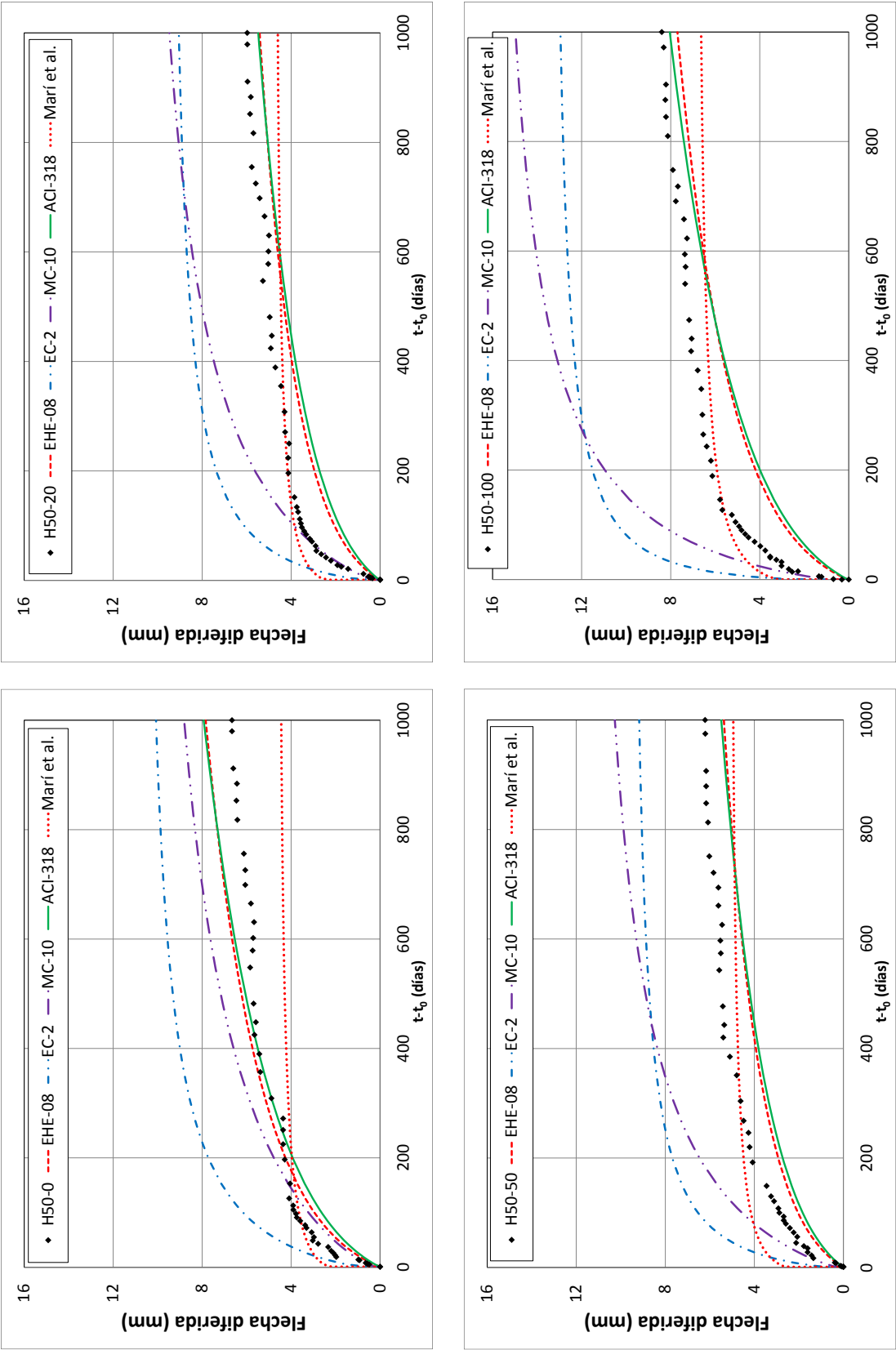


Figura VI-22. Evolución de la flecha diferida. Predicción normativa y resultados experimentales. H50

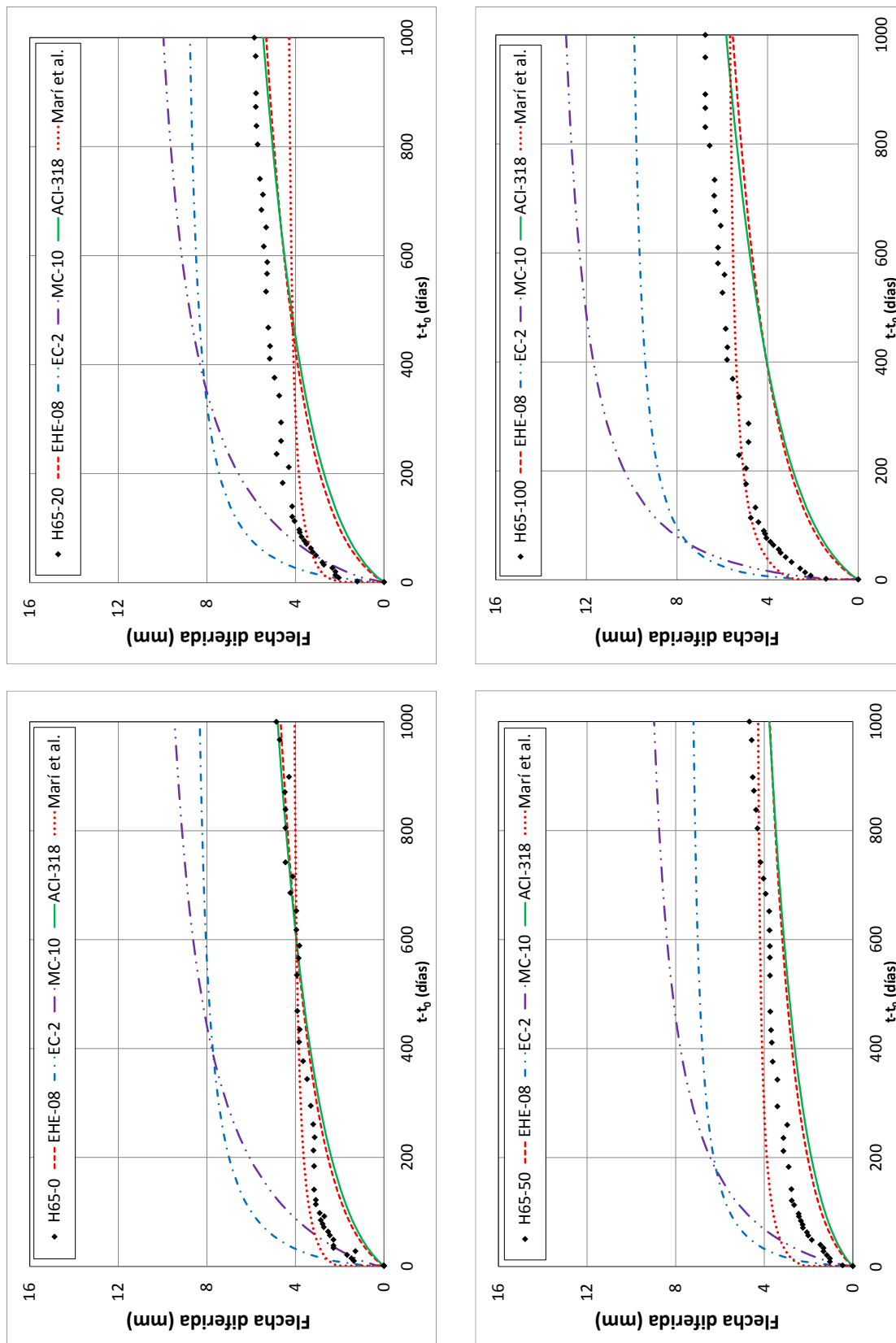


Figura VI-23. Evolución de la flecha diferida. Predicción normativa y resultados experimentales. H65

Para cada grupo de propuestas se ha realizado el ajuste del coeficiente corrector mediante regresión (*Figura VI-24 y Figura VI-25*) obteniéndose el valor de 1.27 y 1.14 para el grupo [EHE-08, ACI318] y [MARÍ10; EC-2; MC-10] respectivamente (*VI-1*). Estos coeficientes deben aplicarse en cada instante a correspondientes ecuaciones normativas de cálculo de la flecha diferida para tener en cuenta la incorporación de árido reciclado.

$$f_{dif,rec} = 1.27 f_{dif,EHE-08}$$

$$f_{dif,rec} = 1.14 f_{dif,EC-2}$$

(VI-1)

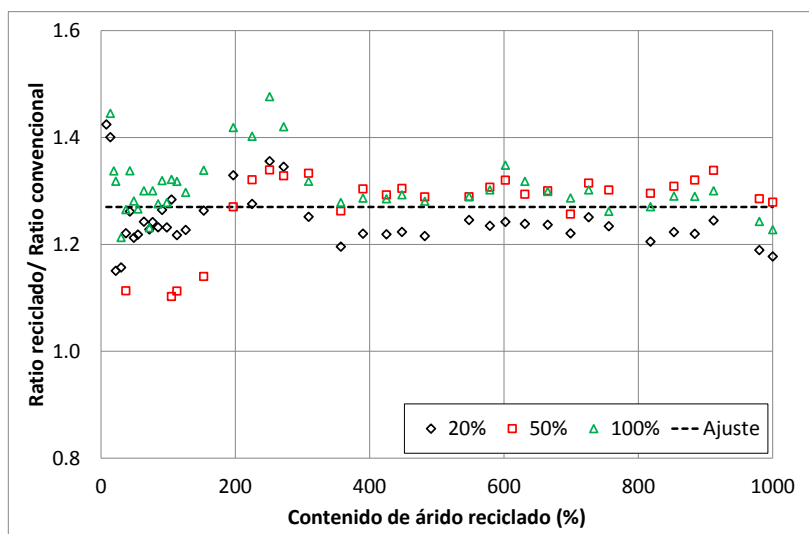


Figura VI-24. Ajuste del coeficiente corrector para predicción de flechas diferidas de acuerdo a EHE y ACI

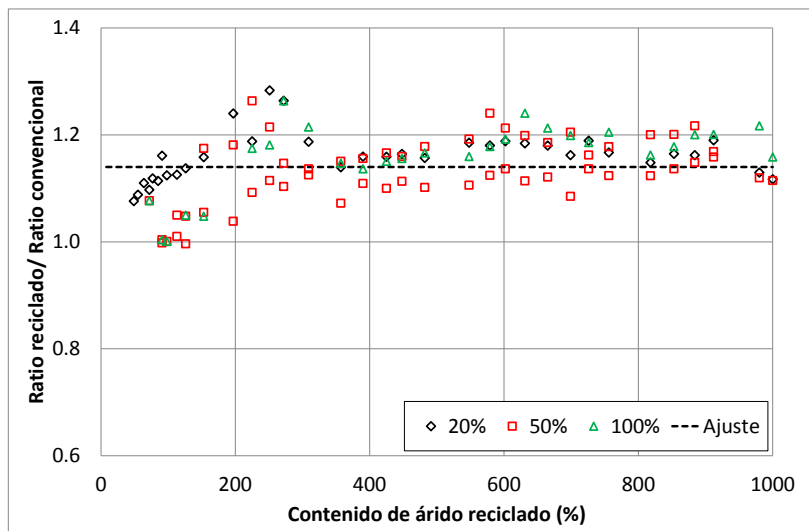


Figura VI-25. Ajuste del coeficiente corrector para predicción de flechas diferidas de acuerdo al EC-2

Las curvas de evolución de flecha con las ecuaciones del Eurocódigo EC-2 y la EHE-08 corregidas por el factor deducido y los valores experimentales de la misma se muestran en la *Figura VI-26*. Con la incorporación de este coeficiente se consigue que en el cálculo de la flecha diferida se obtenga el mismo grado de aproximación en hormigones reciclados que en los convencionales, cuestión que se aprecia claramente en la *Figura VI-27*, donde se muestran los resultados obtenidos a 1000 días.

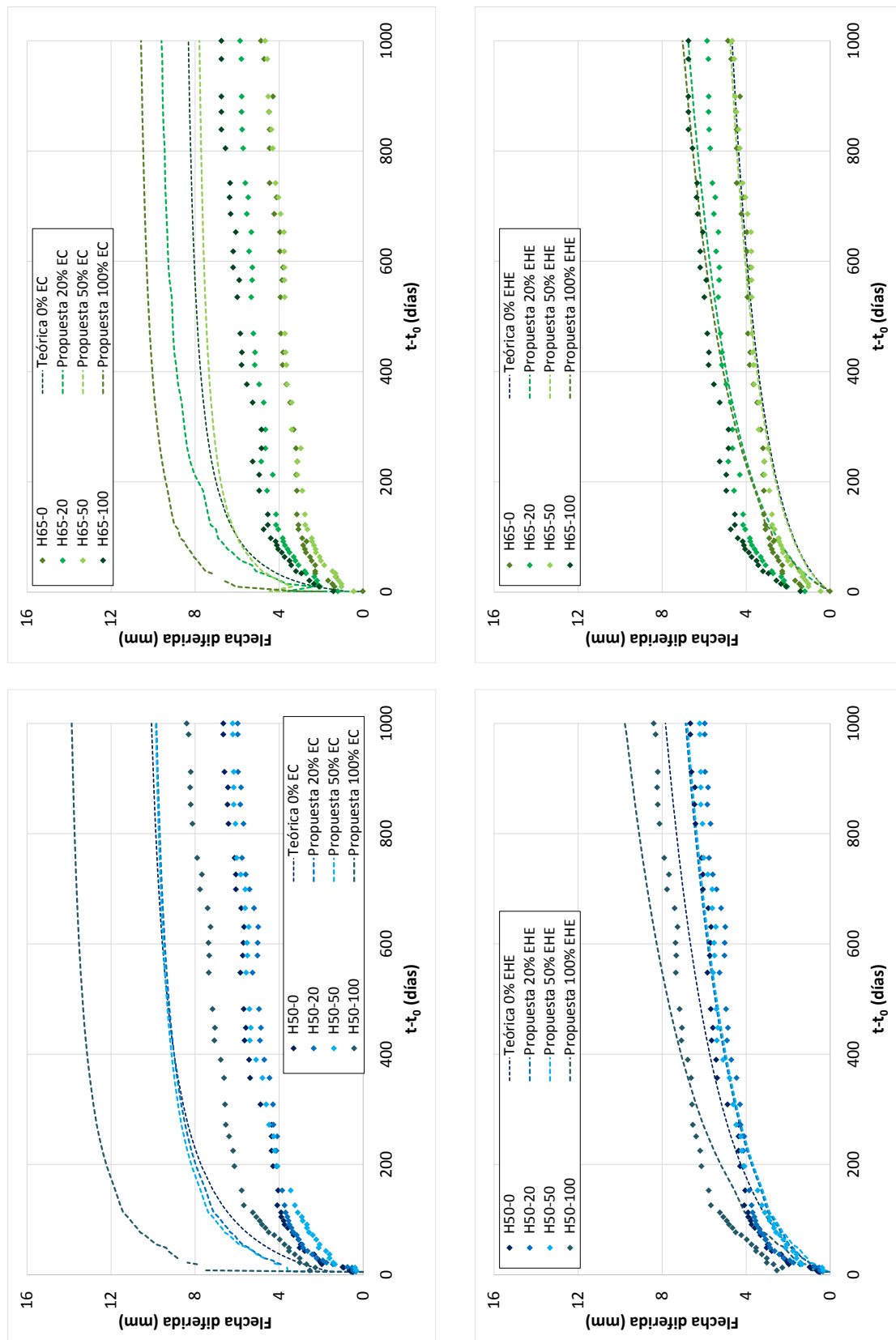


Figura VI-26. Flechas diferidas. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales (EC y EHE).

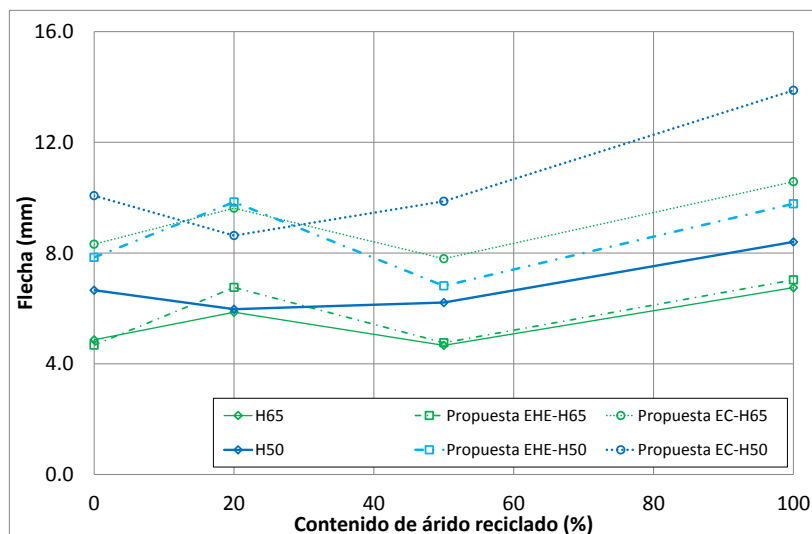


Figura VI-27. Flechas diferidas a 1000 días. Estimación con coeficiente corrector y resultados experimentales (EC)

## 4 CONSIDERACIONES FINALES

### 4.1 Análisis de solicitaciones

En el análisis de solicitaciones se definieron los momentos de fisuración ( $M_{fis}$ ) y de carga ( $M_Q$ ) en cada una de las vigas. Al igual que en el estudio bajo cargas incrementales se constató que el momento de fisuración disminuye al aumentar el porcentaje de árido reciclado empleado, en concordancia con las disminuciones de la resistencia tracción, de la que depende directamente.

### 4.2 Análisis de deformaciones

Se constata que en los 200 primeros días de carga se desarrollan la mayor parte de las deformaciones, tanto en hormigones reciclados como convencionales, tendiendo a estabilizarse a partir de ese momento.

Analizando las deformaciones en la cabeza de compresión de la viga, se desarrollan mayores deformaciones por unidad de tensión en hormigones con árido reciclado que en hormigones convencionales. La deformación diferida unitaria revela una significativa influencia del contenido de árido reciclado sobre el comportamiento de los hormigones de estudio: para el hormigón que sustituye el 100% del árido grueso natural por reciclado se registran incrementos, respecto al hormigón de control, del 34% y 87% en las series H50 y H65 respectivamente.

Se constató además, que la presencia de armadura en las vigas coacciona la libre deformación del hormigón, lo que supone el desarrollo de menores deformaciones que en las probetas, tanto en hormigones reciclados como convencionales.

### 4.3 Análisis de flechas

Los valores de la flecha diferida unitaria revelan una significativa influencia del contenido de árido reciclado sobre el comportamiento de los hormigones estudiados. Respecto a los hormigones patrón de la serie H65, a 1000 días se constatan incrementos en la misma del 21%, 29% y 76% para sustituciones del 20%, 50% y 100% respectivamente. En la serie H50 el incremento medido es del 18%, 34% y 72% respectivamente para los mismos porcentajes de sustitución. Se observa, también que, al igual que con las deformaciones unitarias, la flecha diferida unitaria aumenta en los hormigones reciclados de mayor relación a/c (H65 frente a

H50). Las mayores flechas diferidas de los hormigones reciclados también se constatan a través de la mayor relación entre la flecha diferida y la instantánea en el tiempo.

Del análisis (a partir de 60 días de carga) de la necesidad de correcciones para la predicción de flechas diferidas de acuerdo a las diferentes normativas, se concluye que para conseguir el mismo nivel de precisión entre los hormigones convencionales y los reciclados (mismos ratios “*flecha diferida experimental/ flecha diferida teórica*”) deberá ajustarse un coeficiente corrector que, además, adoptará valores diferentes según se opte por realizar las estimaciones mediante las propuestas de la norma española [EHE-08] y americana [ACI318] o mediante las de las demás expresiones analizadas [MARÍ10; EC-2; MC-10].

Para cada grupo de propuestas se ha realizado el ajuste del coeficiente corrector mediante regresión, obteniéndose el valor de 1.27 y 1.14 para el grupo [EHE-08, ACI318] y [MARÍ10; EC-2; MC-10] respectivamente (VI-1) para cualquier porcentajes de sustitución empleado. Estos coeficientes deben aplicarse en cada instante a las correspondientes ecuaciones normativas de cálculo de la flecha diferida para tener en cuenta la incorporación de árido reciclado.

$$f_{dif,rec} = 1.27 f_{dif,EHE-08}$$

$$f_{dif,rec} = 1.14 f_{dif,EC-2}$$

(VI-1)





---

# VII. COMPORTAMIENTO ADHERENTE

---

## 1 INTRODUCCIÓN

La adherencia entre hormigón y acero es una de las propiedades sobre la que descansa el funcionamiento del hormigón estructural. La suficiente adherencia permite, por un lado, que las barras se traccionen a lo largo de su longitud, limitando la excesiva fisuración del hormigón asegurando la transmisión de esfuerzos tangenciales, y, por otro, colabora decisivamente en el anclaje de las barras traccionadas impidiendo su deslizamiento. La adherencia está controlada por numerosos factores que dependen, esencialmente, de las propiedades de las barras de acero y del hormigón que las rodea.

Entre los mecanismos que contribuyen a la adherencia, el acúñamiento que inducen las corrugas de la armadura es, sin duda, el de mayor relevancia. Junto a ellas se generan tensiones locales sobre el hormigón, de compresión en la dirección perpendicular al plano exterior de la cuña triangular que limitan la barra y la corruga, y de tracción en la paralela. Estas últimas generan los anillos de tracción que, con eje en la barra, pueden derivar en fisuras longitudinales (splitting cracks) si el recubrimiento es insuficiente, si la resistencia  $f_{ct}$  es pequeña, o si se carece de un confinamiento adecuado, materializado bien por la presencia de un refuerzo transversal específico, o bien por la existencia de una presión transversal.

La dependencia de la adherencia con la resistencia a tracción del hormigón (o indirectamente, con su resistencia a compresión) es explícita en todas las ecuaciones que estiman la capacidad adherente entre el hormigón y el acero, y de ahí la necesidad de caracterizar mecánicamente el hormigón, resistente y tensodeformacionalmente. En efecto, a su deformabilidad estará vinculado el deslizamiento que experimente la barra en su progresiva pérdida de adherencia, que puede llegar a ser súbito si se produce el splitting.

En este fenómeno las cargas se concentran entre las corrugas de la armadura provocando la fisuración del hormigón que comienza en el pico de la corruga. El hormigón situado entre ellas transfiere las cargas al circundante, lo que termina en la aparición de fisuras longitudinales (splitting cracks). Por este motivo, se hace imprescindible controlar y conocer la capacidad resistente de cada tipo de hormigón a ensayar.

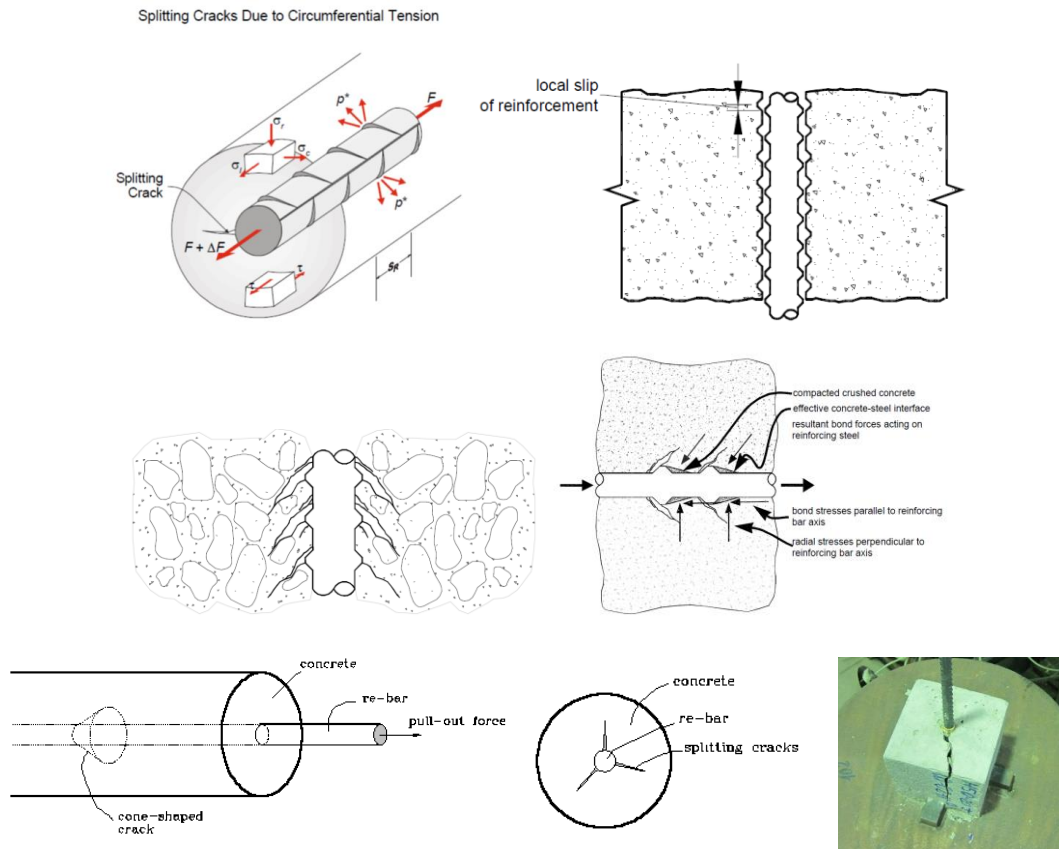


Figura VII-1. Fisuras longitudinales (splitting cracks)

Como es de presumir, por tanto, el empleo del hormigón reciclado induce, como así atestiguan los estudios presentados en el capítulo del estado del arte, menores tensiones de adherencia que las de los hormigones convencionales para deslizamientos equivalentes o, visto de otro modo, deslizamientos mayores para tensiones iguales, y todo ello de forma cuantitativamente dependiente de la cantidad de árido reciclado que sustituye al árido natural. La razón, una vez más, se liga a la presencia del mortero adherido, cuyos efectos ya se han desarrollado en otros apartados de este documento.

En los hormigones reciclados la presencia de mortero adherido supone la aparición de una nueva interfase débil mortero original – mortero nuevo que, previsiblemente, repercutirá en un peor control de la fisuración. Por ello, además de por la escasez de estudios de ámbito internacional sobre el tema [XIAO07; BUTL11], se ha considerado necesario el estudio del comportamiento adherente de los hormigones cuando se sustituye el árido grueso convencional por reciclado en distintos porcentajes, así como su evolución en el tiempo. De este modo, se pretenden identificar las posibles carencias en normativas y recomendaciones para el diseño de hormigones reciclados desde el punto de vista del comportamiento adherente.

Para este estudio, se utilizan, de nuevo, las dos series de hormigón, H50 y H65, con tres porcentajes de sustitución de árido grueso natural por reciclado (20, 50 y 100%), y su correspondiente hormigón de control.

## 2 CARACTERIZACION DEL HORMIGON

A continuación se resumen las propiedades de los hormigones de estudio en estado fresco y endurecido, fabricados para el desarrollo de la fase adherencia.

### 2.1 Consistencia.

Al igual que en la Fase Vigas, se obtuvieron las consistencias del hormigón mediante control de asiento en cono de Abrams, cuyos resultados se detallan en la *Tabla VII-1*.

	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H65-0	H65-20	H65-50	H65-100
<b>a/c efectiva</b>	0.50	0.51	0.51	0.53	0.65	0.66	0.67	0.69
<b>% aditivo</b>	0.43	0.20	0.30	0.20	0.98	0.83	0.42	0.08
<b>Consistencia</b>	5	6	8	9	6	7	6	5

Tabla VII-1. Consistencia obtenida mediante asiento en cono de Abrams. Fase Adherencia

La consistencia depende directamente de la relación agua/cemento efectiva obtenida para cada hormigón, y de la cantidad de aditivo superplastificante empleado que en este caso fue variable, ajustándose el porcentaje a emplear en cada amasada con el objetivo de obtener una consistencia similar entre hormigones reciclados y de control [DAPE11; LOPE09; RAHA08; GONZ08].

### 2.2 Resistencia a compresión

Se determinaron las resistencias a compresión de los hormigones estudiados a diversas edades. En todos los casos se ensayaron probetas cúbicas de 10x10x10 cm, y a 28 días también probetas cilíndricas de 15x30 cm, lo que permitió deducir los coeficientes de paso cúbica – cilíndrica (*Figura VII-2*). Las gráficas de la *Figura VII-3* y la *Figura VII-4* muestran la evolución de la resistencia entre 3 y 365 días para los hormigones de cada serie.

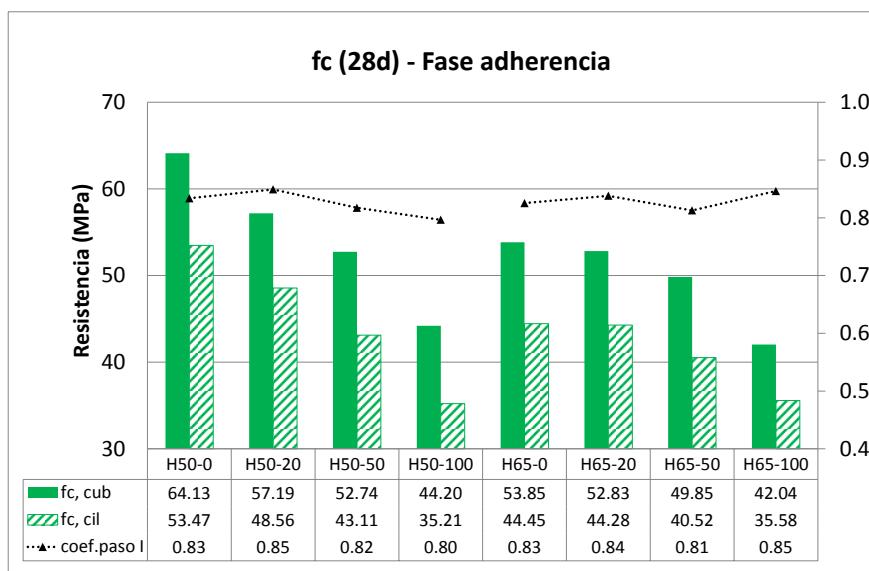


Figura VII-2. Resistencia a compresión en probeta cilíndrica. Fase Adherencia

Se constata una vez más que la resistencia de los hormigones reciclados disminuye a 28 días al crecer el contenido de árido reciclado. Las caídas son de entre el 23% y el 31% a 28 días para porcentajes de sustitución del 100%, reducciones similares a las obtenidas en la Fase Vigas. Comparando las resistencias obtenidas en ambas series, se observa que los

hormigones con mayores resistencias (serie H50) experimentan caídas más importantes que los de la serie H65. Los coeficientes de paso cúbica – cilíndrica ( $f_{c,cil}/f_{c,cub}$ ), además, no dependen ni de la serie ni del porcentaje de sustitución, situándose en todos los casos en el rango [0.8 – 0.85].

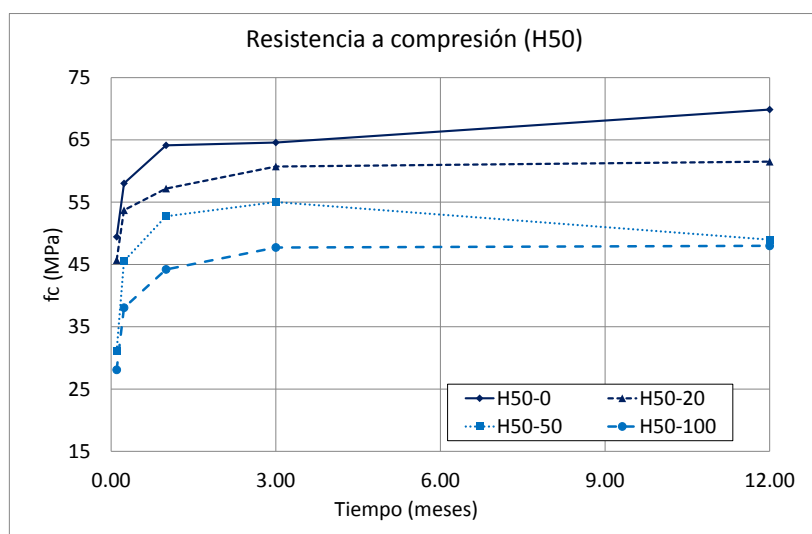


Figura VII-3. Resistencia a compresión a 3, 7, 28, 90 y 365 días. H50 (probeta cúbica). Fase Adherencia

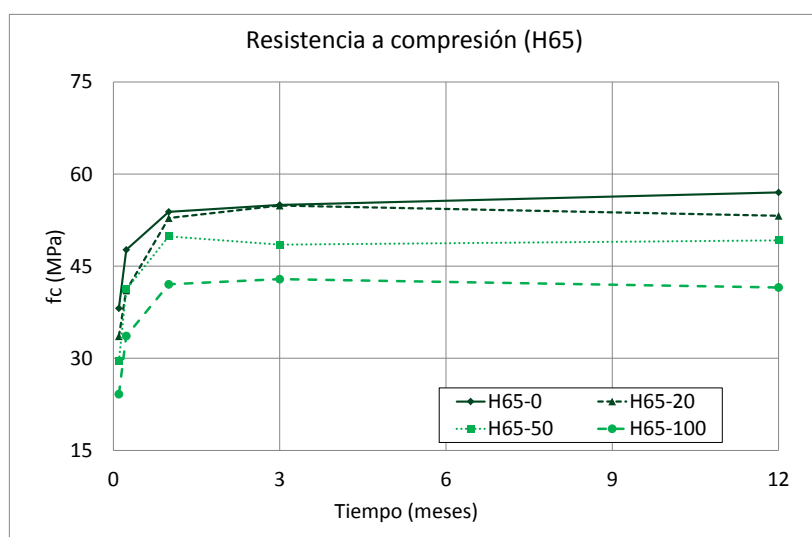


Figura VII-4. Resistencia a compresión a 3, 7, 28, 90 y 365 días. H65 (probeta cúbica). Fase Adherencia

El análisis de evolución temporal de resistencias permite observar, a edades tempranas, entre los 3 y 7 días, dos tendencias de crecimiento de la resistencia diferenciadas. Los hormigones con alto contenido de árido reciclado (50-100% de sustitución) incrementan su resistencia en un 36-46% para ambas series, mientras que aquellos fabricados con un 20% de sustitución lo hacen en un 17-22%, valores similares a los que presenta el hormigón convencional (17-25%).

Esta tendencia se mantiene entre los 7 y 28 días, constatándose que, de nuevo, los hormigones con un alto contenido de árido reciclado (50-100%) experimentan incrementos de resistencia superiores a los convencionales o fabricados con el 20% de sustitución. Aquellos fabricados íntegramente con árido reciclado ven incrementada su resistencia de 7 a 28 días en un 16-25%, datos similares a los obtenidos en otros estudios [AJDU02; CORIO9, KOU12; KWAN12], mientras que los que utilizan el 20% de sustitución y los convencionales lo hacen en un 6-13%.

Entre 28 y 90 días las resistencias continúan creciendo ligeramente (1-8%), observándose, para este intervalo de edad, un comportamiento similar en todos los hormigones, con independencia del porcentaje de árido empleado.

Por último, desde 90 días hasta 365 días el valor de la resistencia a compresión se mantiene prácticamente constante en todos los hormigones reciclados, mientras que en los hormigones convencionales pueden apreciarse, todavía, ligeros incrementos de la resistencia.

La *Tabla VII-2* refleja la relación entre la resistencia a compresión a distintas edades y la obtenida a 28 días en cada hormigón de estudio. De esta forma, se constata una tendencia generalizada a que los hormigones reciclados a desarrollar su resistencia de forma más lenta durante los primeros 90 días de edad, especialmente aquellos con altos porcentajes de sustitución. Así, a 3 días los hormigones reciclados han alcanzado el 64% de la de 28 días, mientras que el hormigón convencional presenta ya un desarrollo del 74%. A 7 días el porcentaje en hormigones reciclados asciende hasta el 85%, mientras que los convencionales alcanzan el 90%. Finalmente a 90 días mientras los hormigones convencionales desarrollan sólo un 1.5% más sus resistencias, los reciclados lo hacen en un 4%.

	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H65-0	H65-20	H65-50	H65-100
<b>3 d</b>	0.77	0.80	0.59	0.64	0.71	0.64	0.59	0.57
<b>7 d</b>	0.90	0.94	0.86	0.86	0.89	0.78	0.83	0.80
<b>90 d</b>	1.01	1.06	1.04	1.08	1.02	1.04	0.97	1.02
<b>365 d</b>	1.09	1.08	0.93	1.09	1.06	1.01	0.99	0.99

Tabla VII-2. Relación entre la resistencia a compresión a distintas edades y a 28 días. o

### 3 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PULL-OUT

La evaluación de la adherencia se abordó mediante ensayos de arrancamiento, tipo pull-out, dadas la facilidad de ejecución y simplicidad de los mismos. Para su desarrollo se fabricaron sobre probetas cúbicas de 10x10x10 cm sin confinamiento, en las que se embebe centrada en la probeta una barra de acero corrugado B500SD de diámetro 10 mm.

#### 3.1 Curvas carga – deslizamiento ( $Q-s$ ).

En la *Figura VII-5* y la *Figura VII-6* se muestran las curvas carga ( $Q$ ) - penetración del extremo libre ( $s$ ; *slip*) correspondientes a los ensayos realizados a diferentes edades (7, 28, 90 y 365 días) para ambas series de hormigón. En todos los casos se constata un incremento de carga hasta los 28 días, y por tanto de la tensión de adherencia, así como una estabilización de la misma a partir de esa edad.

Por otra parte, en todos los hormigones, convencionales y reciclados, puede observarse que las curvas carga-deslizamiento para las diferentes edades son muy similares. Tan sólo se aprecian ligeras diferencias a 7 días, edad en la que las cargas son ligeramente inferiores que las medidas a otras edades.

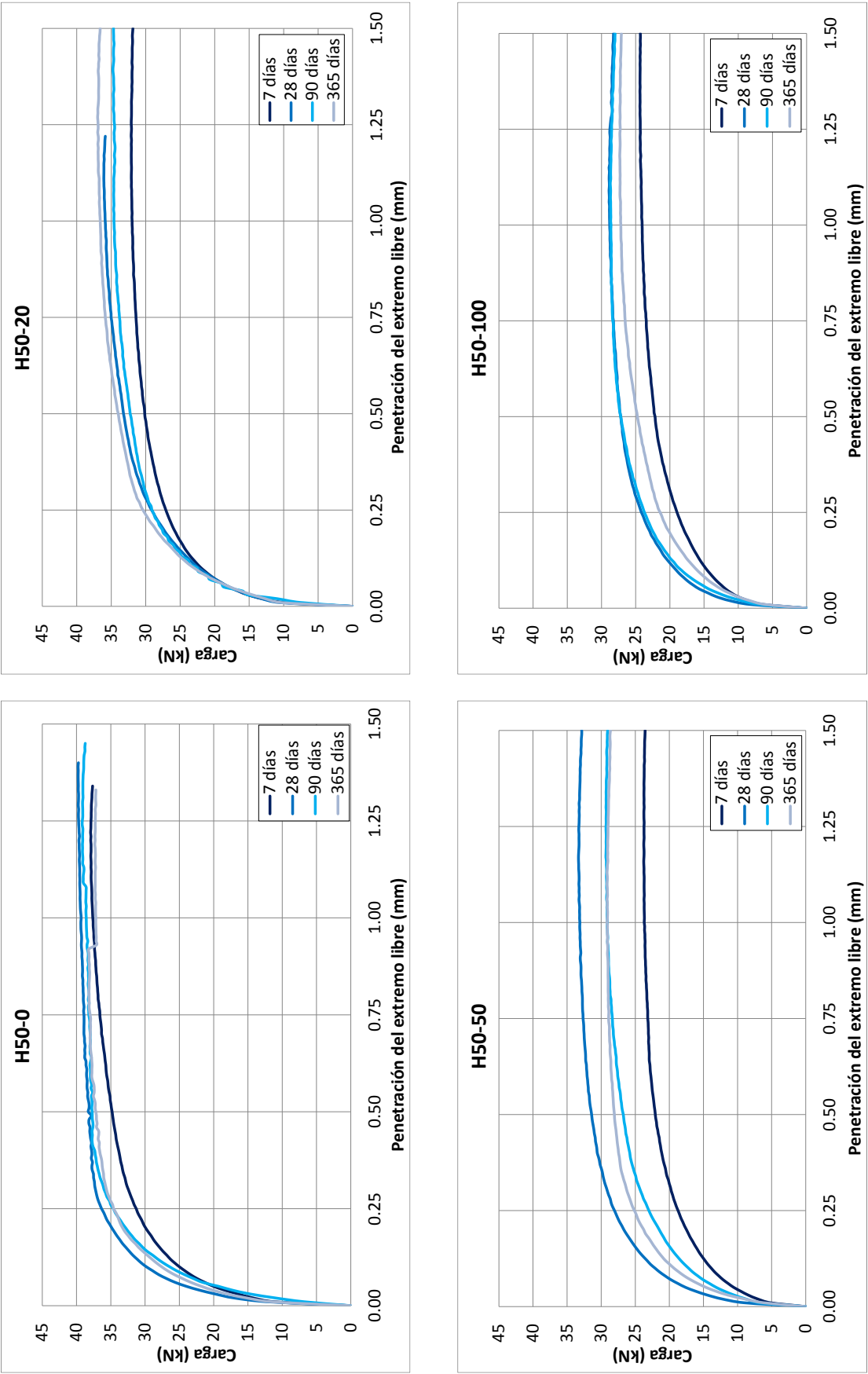


Figura VII-5. Curvas carga-deslizamiento. H50

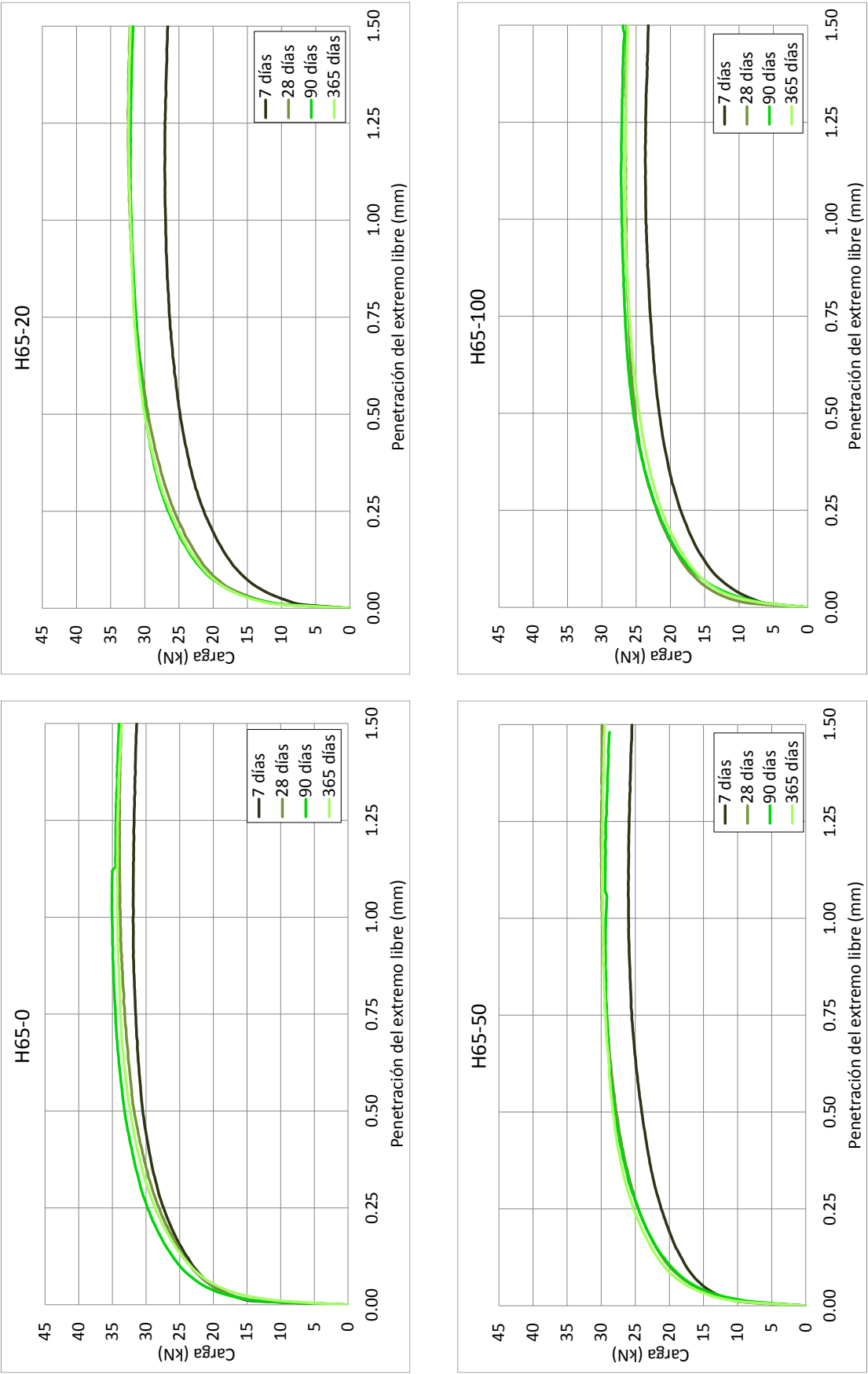


Figura VII-6. Curvas carga-deslizamiento. H65



### 3.2 Cargas y Tensiones de adherencia

Con las curvas carga-deslizamiento se obtienen, para cualquier valor de la carga y mediante la expresión que se muestra en la ecuación (VII-1), las tensiones de adherencia en cada instante de ensayo.

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot r \cdot l_b} \quad (\text{VII-1})$$

Para el análisis del comportamiento adherente se ha optado por establecer como valores de referencia, además de las tensiones máximas ( $\tau_{\text{máx}}$ ) obtenidas a partir de la carga máxima, aquellas que corresponden a una penetración de la barra en el extremo libre de la probeta de 0.01, 0.1 y 1 mm. Estos valores, empleados por diversos autores [MOL104; ALME08], están recogidos como puntos de estudio significativos en distintas normativas o recomendaciones al tratar el comportamiento adherente del hormigón, y su promedio permite obtener la tensión de adherencia media ( $\tau_m$ ) del hormigón. En la *Tabla VII-3* se recogen los valores de las diferentes tensiones de adherencia en MPa, a distintas edades.

Tensión	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H65-0	H65-20	H65-50	H65-100
$\tau_{0.01}(7d)$	7.46	6.31	3.29	4.08	8.83	4.57	6.07	3.79
$\tau_{0.1}(7d)$	13.32	13.99	8.82	9.28	14.67	10.53	11.14	9.06
$\tau_1(7d)$	24.39	20.35	15.08	15.32	20.80	17.16	16.54	15.01
$\tau_m(7d)$	15.06	13.55	9.06	9.56	14.77	10.75	11.25	9.29
$\tau_{\text{máx}}(7d)$	24.41	20.44	15.13	15.52	20.83	17.25	16.58	15.07
$\tau_{0.01}(28d)$	8.35	6.78	5.21	4.98	8.26	5.58	5.53	5.68
$\tau_{0.1}(28d)$	18.70	14.22	13.15	12.26	14.41	12.73	12.19	11.64
$\tau_1(28d)$	25.04	22.84	20.01	18.87	20.59	19.79	18.41	17.45
$\tau_m(28d)$	17.36	14.61	12.79	12.04	14.42	12.70	12.04	11.59
$\tau_{\text{máx}}(28d)$	25.32	22.97	21.22	18.39	21.62	20.67	19.11	16.90
$\tau_{0.01}(90d)$	4.08	5.45	3.85	3.93	8.47	6.12	4.55	3.60
$\tau_{0.1}(90d)$	16.51	14.49	10.63	11.23	15.91	13.74	12.21	10.91
$\tau_1(90d)$	24.03	21.49	18.44	18.47	22.31	20.35	18.32	17.24
$\tau_m(90d)$	14.87	13.81	10.97	11.21	15.56	13.41	11.69	10.58
$\tau_{\text{máx}}(90d)$	24.15	21.50	18.59	18.57	22.33	20.45	18.35	17.32
$\tau_{0.01}(365d)$	7.48	5.70	3.90	3.56	6.32	6.67	5.92	3.92
$\tau_{0.1}(365d)$	17.12	14.17	12.74	9.90	14.90	13.61	13.19	10.83
$\tau_1(365d)$	23.67	22.71	19.51	16.93	21.80	20.46	18.95	17.14
$\tau_m(365d)$	16.09	14.19	12.05	10.13	14.34	13.58	12.68	10.63
$\tau_{\text{máx}}(365d)$	24.32	23.57	19.53	17.05	21.83	20.62	18.99	17.18

Tabla VII-3. Tensiones de adherencia (MPa) a 7, 28, 90 y 365 días

## 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 Modo de fallo

Dos modos de fallo son posibles en un ensayo de arrancamiento. El primero corresponde al deslizamiento generalizado de la barra embebida (pullout), y el segundo a la rotura de la probeta tras la aparición de fisuras radiales, que se inician junto a la corruga de la barra alcanzando la superficie de la probeta hasta producir su colapso (splitting).

En esta investigación se obtuvieron roturas por pullout para las todas las edades de ensayo, tanto en hormigones convencionales como reciclados (*Figura VII-7*).

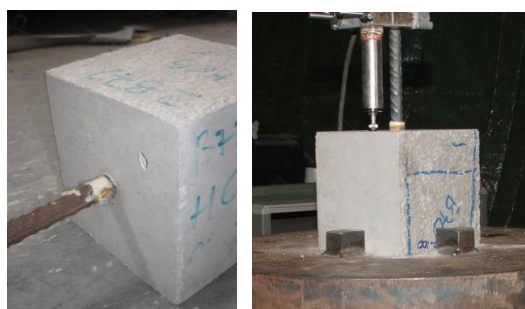


Figura VII-7. Fallo por deslizamiento (pull-out)

### 4.2 Tensión de adherencia máxima y media.

En la *Figura VII-8* y la *Figura VII-9* se muestran los valores de las tensiones de adherencia máxima y media para las diferentes edades. Se constata que, a cualquier edad, son menores las tensiones de adherencia a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de árido natural por reciclado.

Cabe destacar que, al igual que ocurría con la resistencia a compresión, los hormigones H50 con resistencias mecánicas elevadas experimentan mayores reducciones de la tensión de adherencia media y máxima que los H65, con resistencias más bajas. Este efecto es especialmente significativo para porcentajes de sustitución elevados.

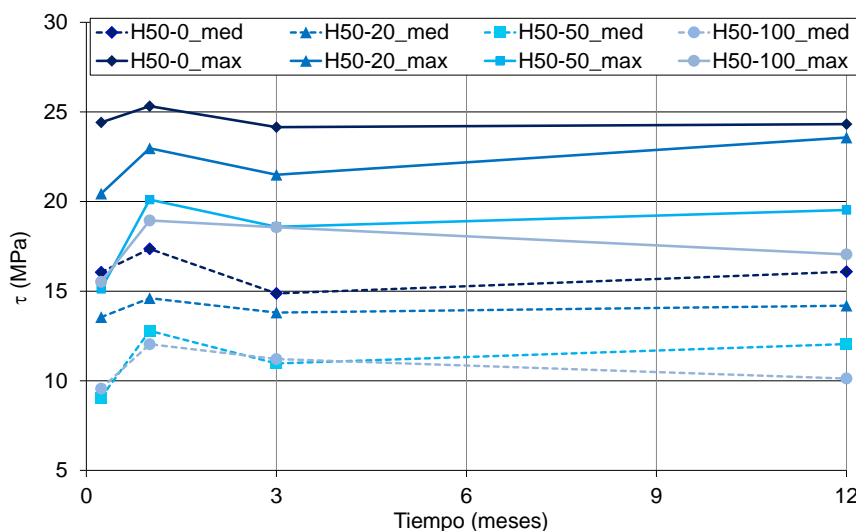


Figura VII-8. Tensiones de adherencia media y máxima a 7, 28, 90 y 365 días. H50

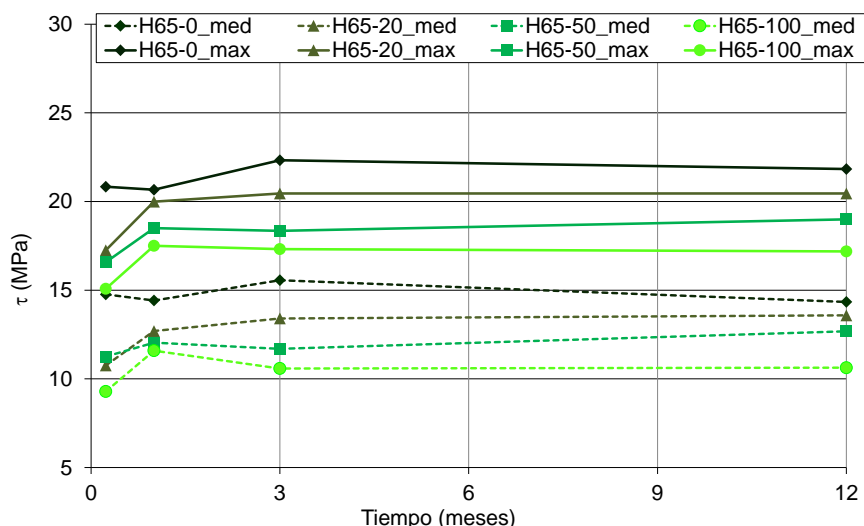


Figura VII-9. Tensiones de adherencia media y máxima a 7, 28, 90 y 365 días H65

A 28 días se constatan mayores caídas de la tensión de adherencia media que de la máxima, con reducciones para los hormigones fabricados íntegramente con árido reciclado del 20-31% respecto al de control. Las tensiones máximas experimentan caídas del 15 y 25% para el H65-100 y H50-100, respectivamente.

En cuanto a la evolución temporal de las tensiones de adherencia (las edades de ensayo se fijaron a 7, 28, 90 y 365 días), se observa que entre 7 y 28 días éstas se desarrollan prácticamente por completo en todos los hormigones de estudio, reciclados y convencionales, permaneciendo estables las medias y máximas entre los 28 y los 365 días.

### 4.3 Tensión de adherencia normalizada.

Es bien conocido que el comportamiento adherente de los hormigones se ve influido directamente por sus propiedades mecánicas. Diferentes autores [MOLI05; ALME08; BUTL11] coinciden en señalar la relación entre la tensión de adherencia y la resistencia a compresión ( $\tau_m/f_c$  y  $\tau_{m\acute{a}x}/f_c$ ) como un parámetro idóneo de comparación del comportamiento adherente, aunque otros [XIAO07; FORO08; KHAN08] consideran más adecuada la relación entre la tensión adherente y la raíz cuadrada de la resistencia a compresión del hormigón ( $\tau_m/\sqrt{f_c}$  y  $\tau_{m\acute{a}x}/\sqrt{f_c}$ ). El Código Modelo [MC-10] recoge dos relaciones genéricas entre la tensión de adherencia y la resistencia a compresión, en función del tipo de rotura asociado a la curva tensión – deslizamiento. Si ésta se produce por deslizamiento generalizado (rotura por pull-out) la tensión adherente depende de  $(f_c)^{0.5}$ , haciéndolo de  $(f_c)^{0.25}$  cuando el fallo es prematuro por splitting. El Eurocódigo EC-2 [EC-2] asocia el dimensionamiento de las longitudes de anclaje a una tensión de adherencia ligada a de tracción del hormigón, lo que implica establecer la relación con  $(f_c)^{0.66}$ . Dado que en esta investigación todas las roturas se producen por pull-out, la comparación entre las prestaciones adherentes de cada hormigón estudiado se realizará normalizando las tensiones adherentes medidas mediante el factor  $(1/\sqrt{f_c})$ , tal como algunos autores ya han considerado previamente [FORO08].

La Figura VII-10 muestra, para la edad de 28 días, las tensiones de adherencia normalizadas, máxima y media, de los diferentes hormigones. En ella se observa que el valor de  $\tau_{m\acute{a}x}/\sqrt{f_c}$  disminuye un 5-9% en hormigones fabricados con el 100% de árido grueso reciclado, y un 9-12% en el caso de  $\tau_m/\sqrt{f_c}$ .

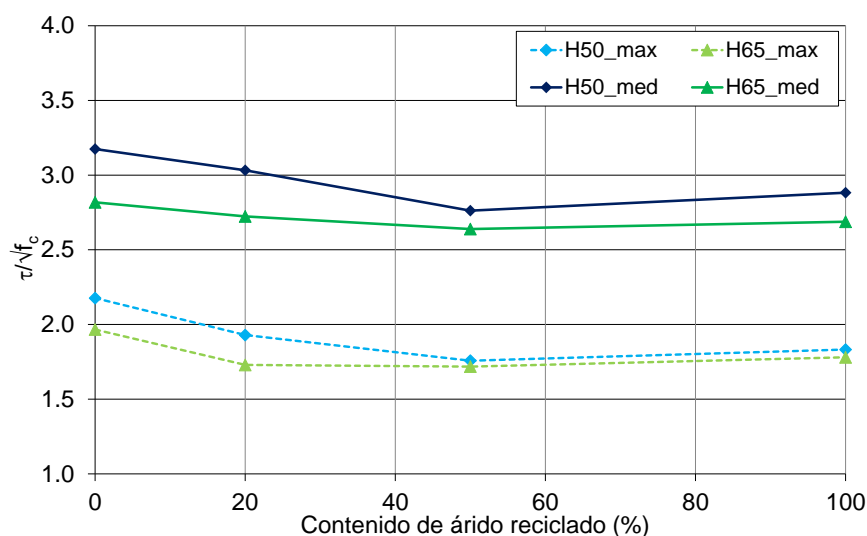


Figura VII-10. Tensión de adherencia máxima y media normalizadas a 28 días

#### 4.4 Forma de la curva

Una vez analizada la influencia del árido reciclado en la tensión de adherencia máxima, se estudia el modo en que lo hace sobre la forma de la curva tensión de adherencia - deslizamiento. Para ello se calcula la tensión de adherencia unitaria a partir del valor máximo registrado durante el ensayo, definiéndose así la curva tensión de adherencia unitaria-deslizamiento.

En la *Figura VII-11* y en la *Figura VII-12* se representan las curvas unitarias obtenidas para las dos series de hormigón, H50 y H60 respectivamente, a diferentes edades de ensayo. Pese a su similitud con las curvas que proporcionan los hormigones convencionales, se observa que en los hormigones reciclados se producen mayores deslizamientos asociados a cada tensión unitaria. En efecto, los deslizamientos obtenidos para cualquier valor de tensión de adherencia unitaria son mayores en los hormigones reciclados que en los convencionales y, en general, aumentan con el porcentaje de sustitución empleado. Se corrobora esta evidencia incluso para tensiones de adherencia unitarias pequeñas, según reflejan los valores incluidos en la *Tabla VII-4*, que recoge los deslizamientos para las tensiones unitarias 0.25 y 0.75. Es destacable, además, la similitud para ambas series de la forma de la curva tensión adherente unitaria – deslizamiento.

Edad		H50				H65			
días	$\tau/\tau_{\text{máx}}$	0%	20%	50%	100%	0%	20%	50%	100%
7	0.25	0.008	0.008	0.012	0.009	0.017	0.054	0.029	0.058
	0.75	0.158	0.170	0.188	0.209	0.125	0.205	0.168	0.212
28	0.25	0.008	0.008	0.009	0.009	0.006	0.008	0.008	0.008
	0.75	0.097	0.186	0.152	0.158	0.152	0.189	0.164	0.163
90	0.25	0.009	0.013	0.013	0.011	0.007	0.008	0.010	0.014
	0.75	0.120	0.158	0.211	0.169	0.131	0.158	0.154	0.186
365	0.25	0.008	0.009	0.014	0.013	0.009	0.008	0.008	0.012
	0.75	0.104	0.174	0.148	0.207	0.151	0.168	0.141	0.194

Tabla VII-4. Deslizamiento para las tensiones de adherencia unitarias  $\tau/\tau_{\text{máx}} = 0.75$  y  $\tau/\tau_{\text{máx}} = 0.25$

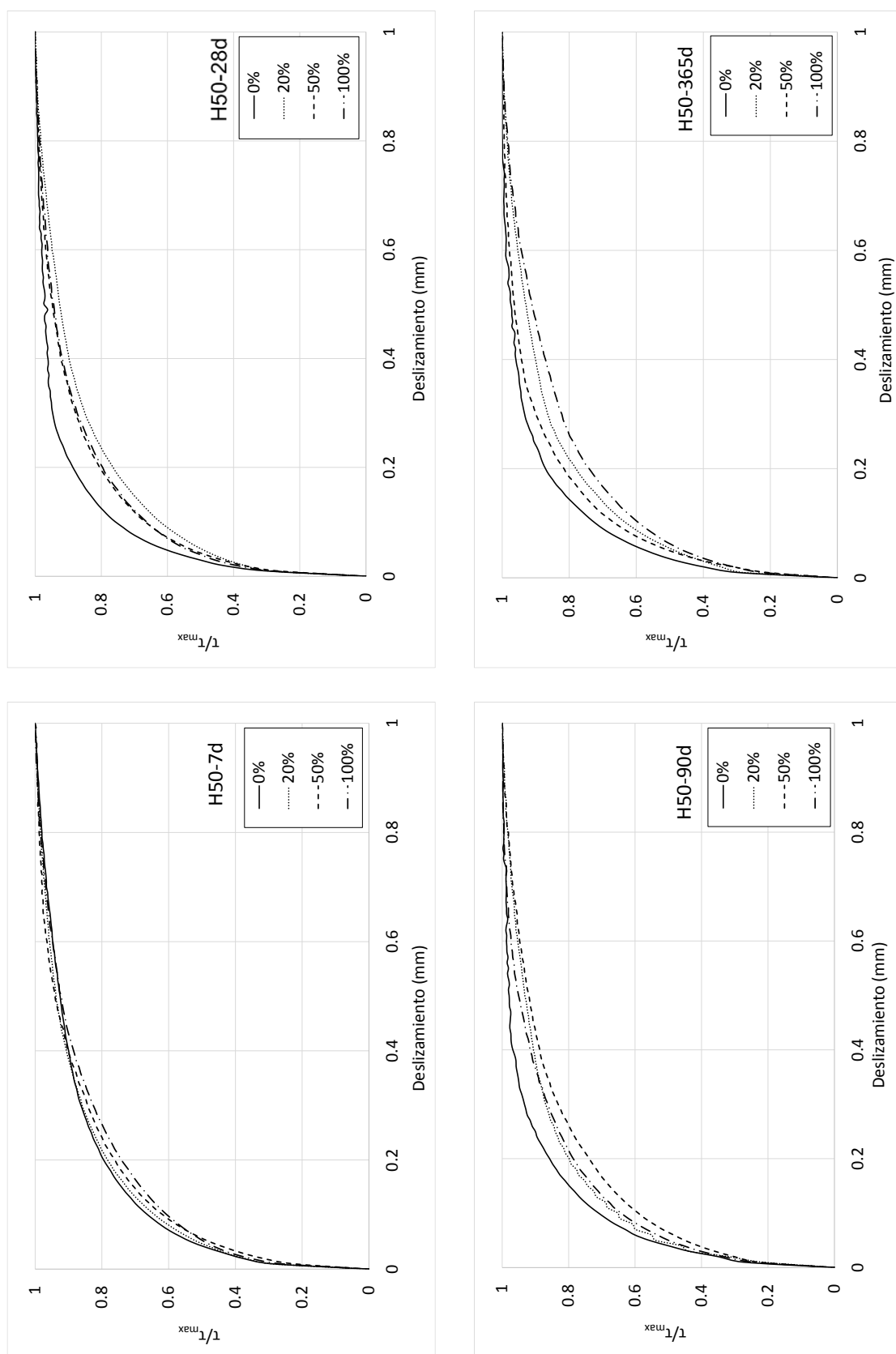


Figura VII-11. Curvas tensión de adherencia unitaria-deslizamiento a distintas edades. H50

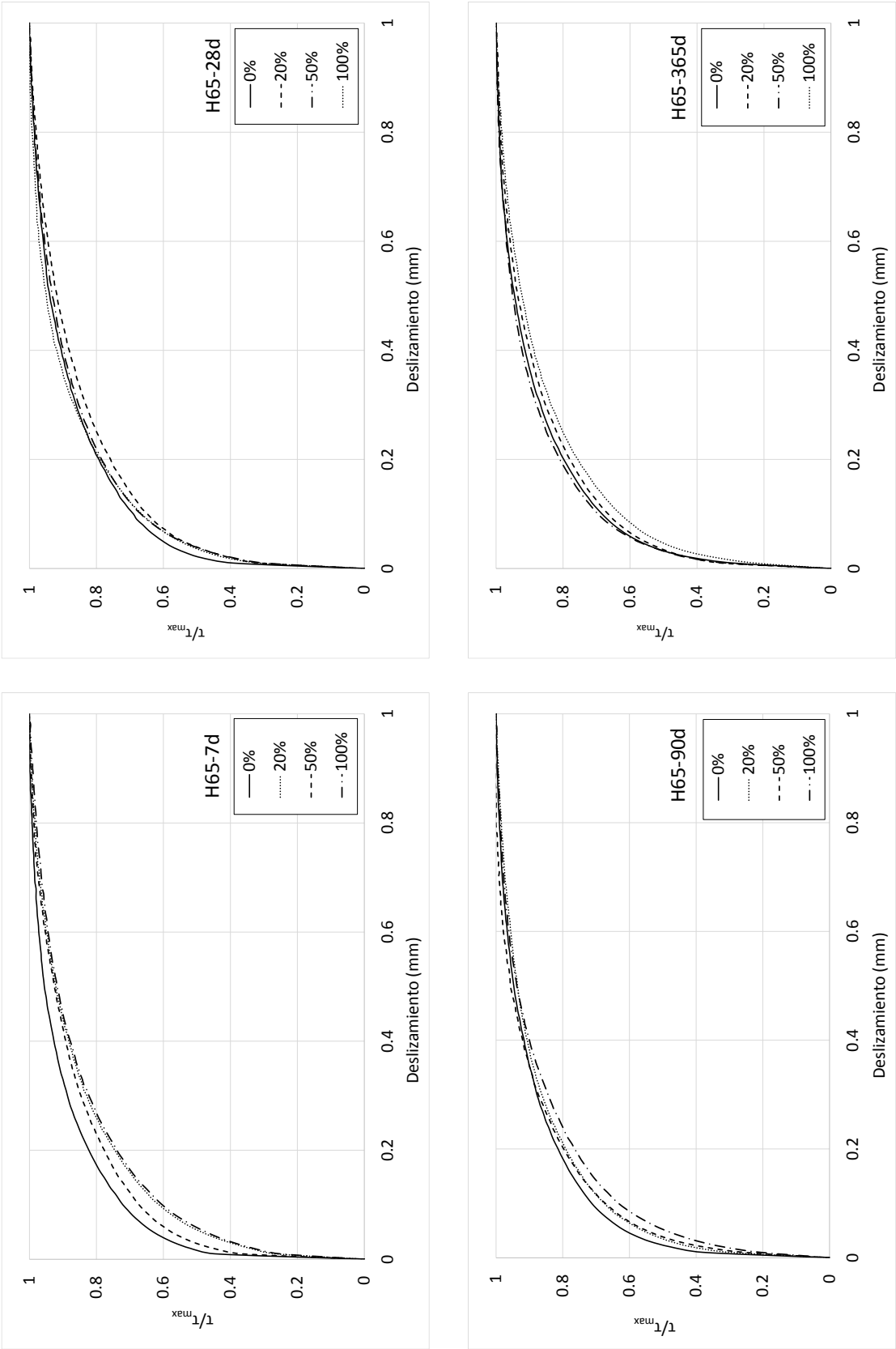


Figura VII-12. Curvas tensión de adherencia unitaria-deslizamiento a distintas edades. H65

El hecho de que el deslizamiento para un determinado valor de tensión de adherencia unitaria aumente al hacerlo el porcentaje de sustitución significa, también, que la tensión de adherencia unitaria desarrollada para un valor determinado de deslizamiento decrece con el incremento del porcentaje de árido reciclado empleado. En la *Figura VII-13* se muestran, para ambas series de hormigón y a las diferentes edades, las curvas tensión de adherencia unitaria – deslizamiento promediadas entre ambas series.

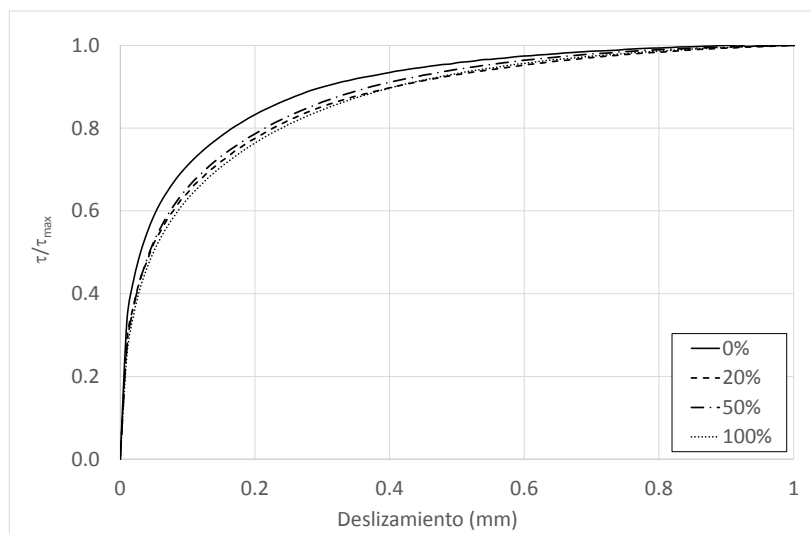


Figura VII-13. Curva tensión de adherencia unitaria-deslizamiento promedio

La disminución porcentual de la tensión de adherencia para diferentes valores de deslizamiento se muestra en la *Tabla VII-5*. En ella se observa que las mayores mermas se producen para deslizamientos pequeños: en 0.01 mm la tensión de adherencia cae un 13.69%, un 18.94% y un 24.45% para porcentajes de sustitución del 20%, 50% y 100% respectivamente, mientras que para deslizamientos de 0.1 mm, el descenso se reduce a un 8.13%, 7.51% y 10.84% para los mismos porcentajes de sustitución.

Deslizamiento (mm)	0%	20%	50%	100%
<b>0.01</b>	0.00	13.69	18.94	24.45
<b>0.05</b>	0.00	9.77	10.51	14.01
<b>0.10</b>	0.00	8.13	7.51	10.84
<b>0.25</b>	0.00	5.11	4.24	6.46
<b>1.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla VII-5. Disminución porcentual de la tensión de adherencia unitaria respecto al hormigón convencional

## 5 ESTIMACIÓN DE LA RESPUESTA ADHERENTE DEL HORMIGÓN RECICLADO

### 5.1 Estimación de la tensión de adherencia última

Las normas y códigos de hormigón proponen métodos para evaluar la capacidad adherente entre el hormigón y el acero. En este apartado se aplican las expresiones teóricas de predicción de las curvas tensión de adherencia -deslizamiento y de predicción de la tensión de adherencia última a los hormigones reciclados de estudio con el fin de conocer la bondad de las mismas cuando se utilizan hormigones reciclados. Se analiza, así, la necesidad de

introducir en dichas expresiones coeficientes de corrección que tengan en cuenta la presencia de árido reciclado.

En las normas y códigos seleccionados [EHE08; ACI-318; EC-2; MC-10] se incluyen expresiones para estimar la tensión de adherencia última o máxima ( Tabla VII-6). Se ha analizado también la propuesta de Kim [KIM12], específica para hormigones reciclados ya que incorpora como variable el porcentaje árido reciclado empleado.

$\tau_{\text{máx}}$		
<b>EHE-08</b>	$\tau_{\text{bu}} \geq 12.74 - 0.19 \cdot \phi$ <p>Expresión obtenida a partir de [ACHE00]</p> $\tau_{\text{bu},5} = \frac{(90-5)}{80} \cdot (12.74 - 0.19 \cdot \phi) \cdot \left( \frac{f_{\text{ck}}}{22.5} \right)^{0.5}$	$\phi$ : diámetro de la barra (mm)
<b>MC-10</b>	$\tau_{\text{máx}} = 2.5 \cdot (f_{\text{cm}})^{0.5}$	$f_{\text{cm}}$ : resistencia media de las probetas (MPa)
<b>EC-2</b>	$\tau_{\text{máx}} = 2.25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot (f_{\text{ctd}})$	$\eta_1$ : coeficiente según la posición de la barra $\eta_2$ : coeficiente según el diámetro de la barra $f_{\text{ctd}}$ : resistencia a tracción de cálculo (MPa)
<b>ACI-318</b>	$\tau_{\text{máx}} = 5.91 \cdot (f_{\text{cm}})^{0.5}$	$f_{\text{cm}}$ : resistencia media de las probetas (MPa)
<b>Kim (2012)</b>	$\tau_{\text{máx}} = 0.614 \cdot (f_{\text{cm}})^{0.5} \left[ \frac{c_c}{d_b} - 0.55 \right] -$ $- (0.423 \cdot e^{0.0172 \cdot S} + 0.007 \cdot G)$	$c_c$ : recubrimiento del hormigón (mm) $d_b$ : diámetro de la barra (mm) $S$ : contenido de árido fino reciclado (%) $G$ : contenido de árido grueso reciclado (%)

Tabla VII-6. Expresiones que estiman la tensión de adherencia

A partir de estas expresiones y de las resistencias a compresión experimentales se han calculado los valores de la tensión de adherencia máxima de las barras de 10 mm ancladas 5  $\emptyset$  utilizadas en los ensayos (Figura VII-14 y Figura VII-15). Como se constata en los resultados obtenidos en este estudio, la menor resistencia de los hormigones reciclados conduce a que se estimen menores tensiones de adherencia al aumentar el porcentaje de sustitución del árido natural por reciclado.

La bondad de las distintas expresiones se analiza, a partir de las estimaciones teóricas y los resultados experimentales, mediante la comparación de la ratio “*tensión de adherencia experimental/ tensión de adherencia estimada*” (Tabla VII-7) en cada hormigón. Se observa que las ratios calculadas disminuyen al aumentar el porcentaje de sustitución de árido grueso natural por reciclado.



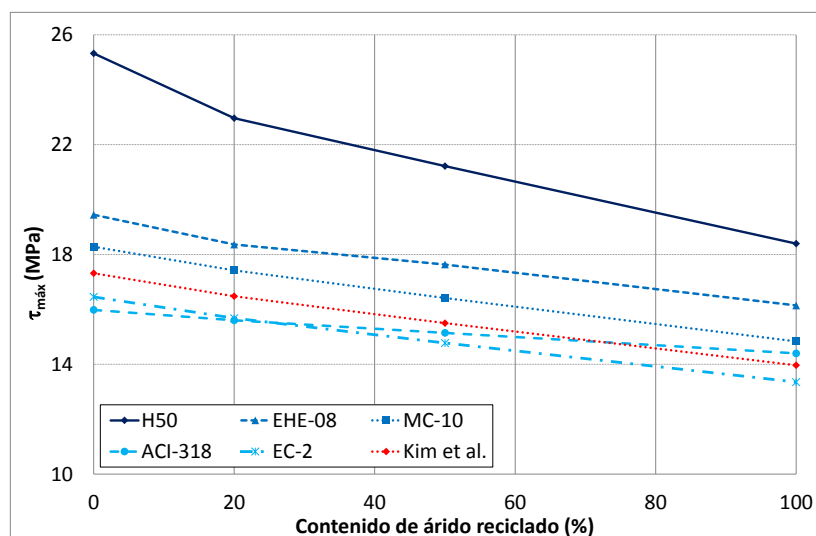


Figura VII-14. Estimación de la tensión de adherencia máxima. H50

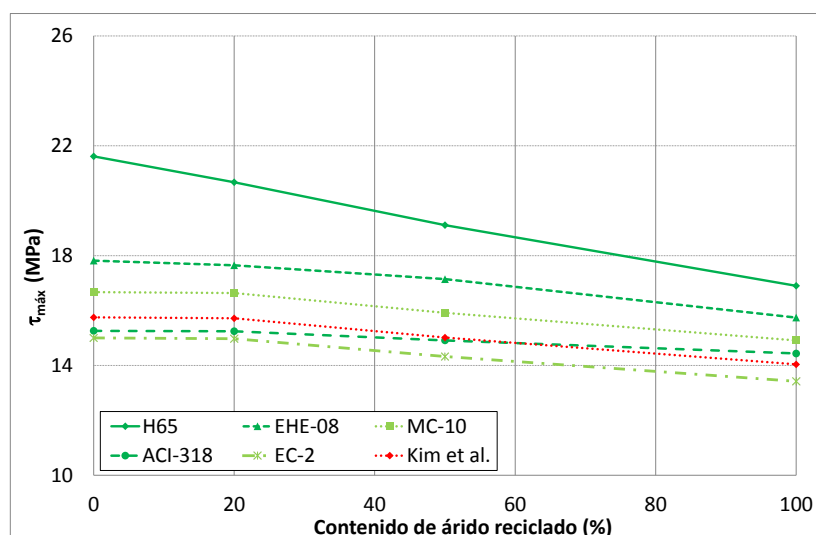


Figura VII-15. Estimación de la tensión de adherencia máxima. H65

	H50-0	H50-20	H50-50	H50-100	H65-0	H65-20	H65-50	H65-100
<b>EHE-08</b>	1.30	1.25	1.20	1.14	1.21	1.17	1.11	1.07
<b>MC2010</b>	1.39	1.32	1.29	1.24	1.30	1.24	1.20	1.13
<b>ACI-318</b>	1.58	1.48	1.40	1.26	1.41	1.36	1.27	1.18
<b>EC2</b>	1.52	1.48	1.43	1.35	1.42	1.39	1.32	1.27
<b>Kim</b>	1.46	1.39	1.37	1.32	1.37	1.32	1.27	1.20

Tabla VII-7. Ratio "tensión máxima experimental/ tensión máxima estimada"

Se confirma, por tanto, la necesidad de corregir las expresiones normativas con el fin de garantizar en los hormigones reciclados las mismas ratios "tensión de adherencia experimental/ tensión de adherencia teórica" que en los convencionales.

En este caso se ha optado por utilizar, como base para la corrección, la expresión propuesta por el MC-10 para estimar la tensión máxima de adherencia en ensayos de tipo Pull-out (VII-3).

$$\tau_{m\acute{a}x} = 2.5 \sqrt{f_c} \quad (VII-2)$$

A partir de los resultados obtenidos experimentalmente, se han calculado mediante ajuste por regresión los coeficientes que permiten determinar la tensión de adherencia de los hormigones reciclados con diferentes porcentajes de sustitución, manteniendo las ratios “*tensión de adherencia experimental/ tensión de adherencia teórica*” en valores similares a la de convencionales (Figura VII-16).

Aplicando el coeficiente corrector calculado a la expresión del MC-10 se obtiene finalmente la ecuación (VII-3), propuesta para la estimación teórica de la tensión de adherencia en los hormigones reciclados con distintos porcentajes de sustitución %RCA (en tanto por uno).

$$\tau_{m\acute{a}x} = 2.5 \sqrt{f_c} (1 - 0.124 \%RCA) \quad (VII-3)$$

La Figura VII-17 muestra los resultados experimentales de la tensión de adherencia máxima y las correspondientes estimaciones obtenidas con la corrección propuesta para los diferentes hormigones de estudio.

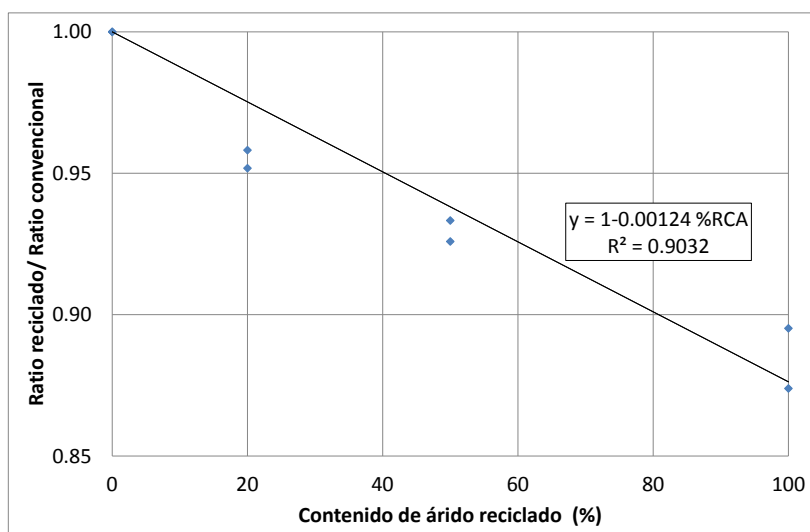


Figura VII-16. Ajuste del coeficiente corrector para la predicción de la de la tensión de adherencia máxima

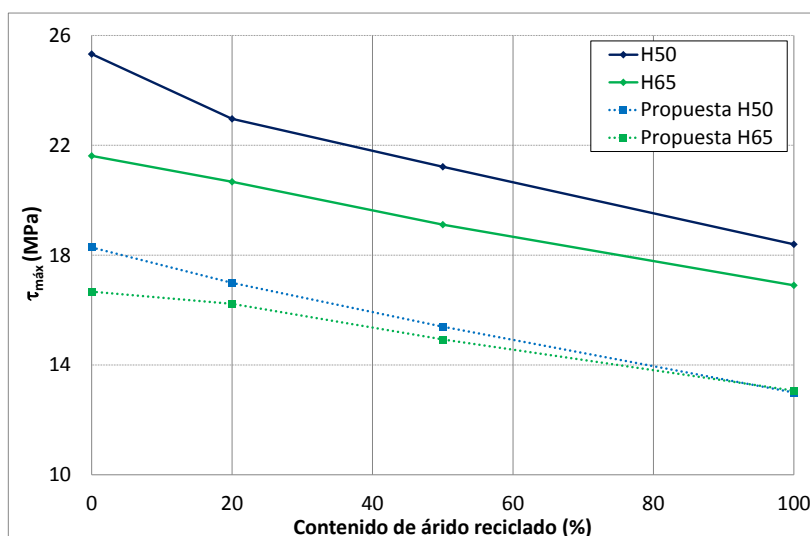


Figura VII-17. Tensiones de adherencia máximas. Predicción con coeficiente corrector y resultados experimentales

## 5.2 Estimación de la forma de la curva Tensión de adherencia – deslizamiento.

El Código Modelo propone una expresión para modelizar la curva tensión de adherencia – deslizamiento a partir de la tensión máxima de adherencia (VII-4).

$$\tau = \tau_{m\acute{a}x} \left( \frac{s}{s_1} \right)^\alpha \quad \begin{array}{l} \text{para } 0 \leq s \leq 1 \text{ mm} \\ s_1: 1 \text{ mm (deslizamiento para } \tau_{m\acute{a}x}) \\ \alpha = 0.4 \end{array} \quad (VII-4)$$

$$\tau = \tau_{m\acute{a}x} \quad \text{para } s \geq 1 \text{ mm}$$

En la Figura VII-17 y en la *Figura VII-19* se muestran las curvas tensión de adherencia–deslizamiento teóricas aplicando (4) y experimentales para ambas series de estudio. La tensión de adherencia máxima considerada para las curvas teóricas es la calculada a partir de la expresión propuesta en el apartado anterior para hormigones reciclados.

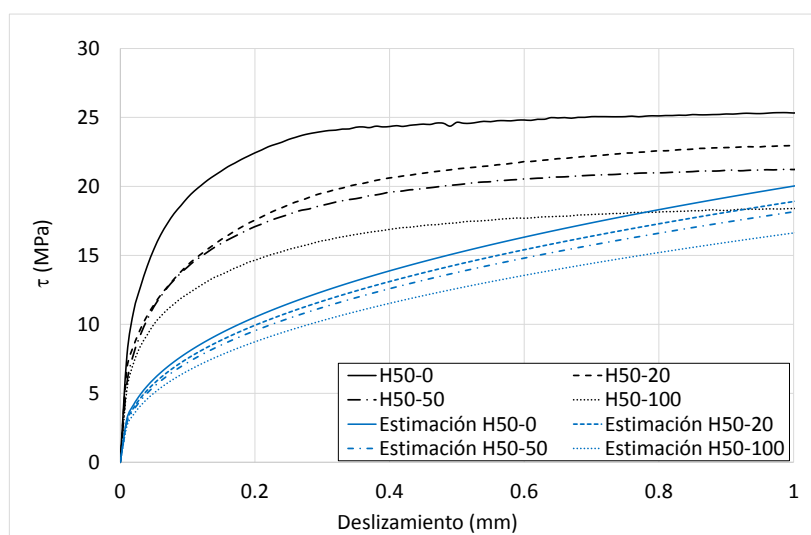


Figura VII-18. Curvas tensión de adherencia – deslizamiento experimentales y teóricas. H50

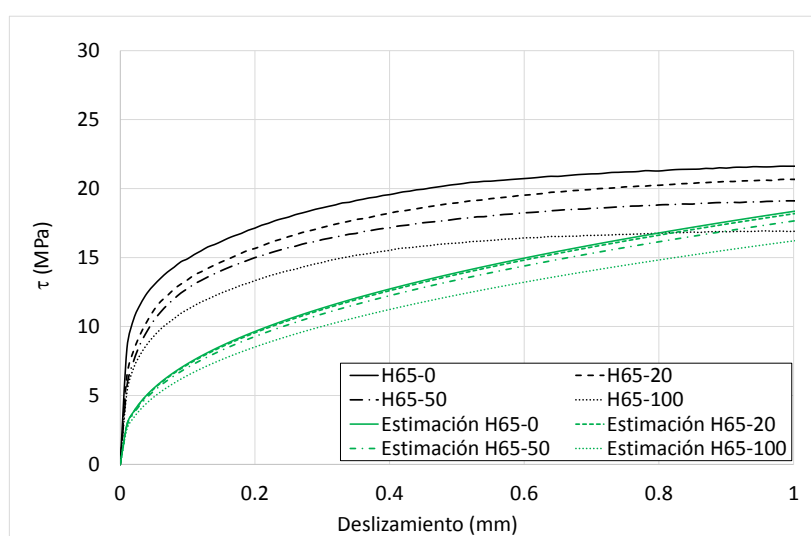


Figura VII-19. Curvas tensión de adherencia – deslizamiento experimentales y teóricas. H65

Para todo el rango de deslizamientos cubierto, los valores de “*tensión de adherencia experimental/ tensión de adherencia teórica*” se reducen a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de árido grueso natural por reciclado. Este efecto va en detrimento de la capacidad adherente inicial, que se traduce en un peor comportamiento adherente en servicio (pequeños deslizamientos,  $s \approx 0.1\text{mm}$ ) [MC-10] de los hormigones reciclados frente a los convencionales. Por ello, resulta necesario corregir la forma de la curva teniendo en cuenta el porcentaje de sustitución de árido grueso reciclado empleado.

De modo análogo al seguido en el caso de la tensión de adherencia máxima, se ha calibrado la corrección que debe aplicarse sobre la expresión (VII-4) para generalizarla al caso de los hormigones con áridos reciclados (VII-5) y obtener así el mismo grado de aproximación de la curva tensión adherente – deslizamiento en hormigones reciclados que en los convencionales.

$$\begin{aligned}
 \tau_b &= \tau_{\max} s^{0.431} & \left\{ \begin{array}{l} \text{para } 0 \leq s < 1 \text{ mm} \\ \%RCA \leq 20 \end{array} \right. \\
 \tau_b &= \tau_{\max} s^{(0.429+0.0001\%RCA)} & \left\{ \begin{array}{l} \text{para } 0 \leq s < 1 \text{ mm} \\ 20 < \%RCA \leq 100 \end{array} \right. \\
 \tau &= \tau_{\max} & \text{para } s \geq 1 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{VII-5}$$

La Figura VII-20 y la Figura VII-21 muestran las estimaciones teóricas de la curva obtenidas con la expresión propuesta. Para este cálculo se considera la tensión de adherencia máxima ( $\tau_{\max}$ ) de acuerdo a la corrección propuesta anteriormente para cada uno de los hormigones de estudio.

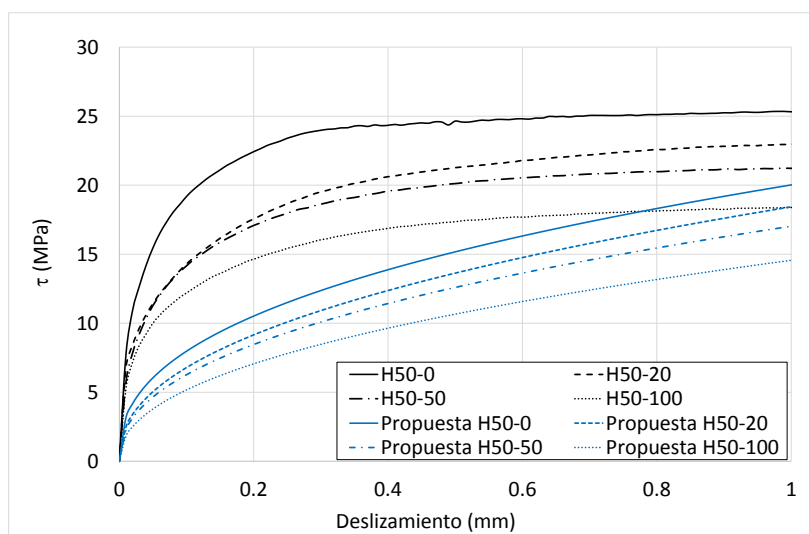


Figura VII-20. Curvas tensión de adherencia – deslizamiento experimentales y teóricas corregidas. H50

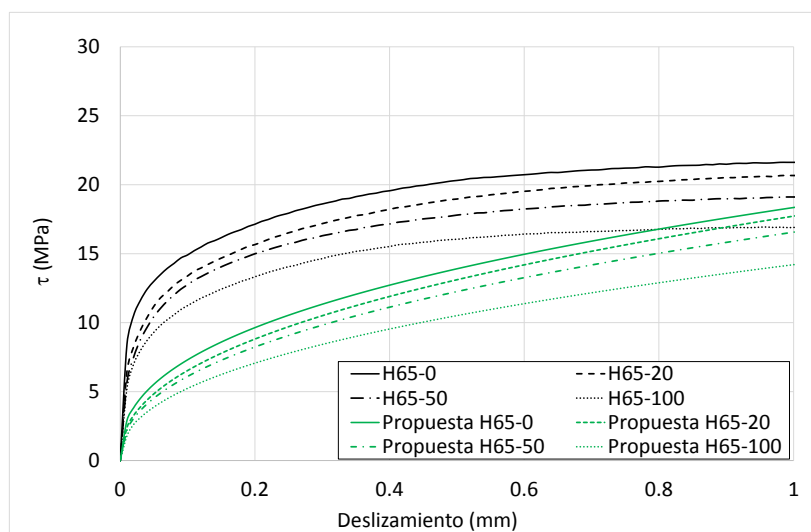


Figura VII-21. Curvas tensión de adherencia – deslizamiento experimentales y teóricas corregidas. H65

## 6 CONSIDERACIONES FINALES

Una vez realizado el estudio del comportamiento adherente en hormigones reciclados, se obtienen las siguientes conclusiones:

La evolución temporal de la resistencia a compresión en hormigones convencionales y reciclados es diferente, especialmente a edades tempranas. Así, a 3 días los hormigones reciclados han alcanzado el 64% de la de 28 días, mientras que el hormigón convencional presenta ya un desarrollo del 74%. A 7 días el porcentaje en hormigones reciclados asciende hasta el 85%, mientras que los convencionales alcanzan el 90%. Finalmente a 90 días mientras los hormigones convencionales desarrollan sólo un 1.5% más sus resistencias, los reciclados lo hacen en un 4%.

La tensión de adherencia máxima en los hormigones reciclados es inferior a la de los hormigones convencionales de igual dosificación y, además, disminuye, en porcentajes similares a cómo lo hace la resistencia a compresión, al crecer el porcentaje de árido grueso reciclado empleado.

La evolución temporal de la tensión de adherencia es similar a la de la resistencia a compresión. Entre 7 y 28 días se constata un crecimiento ligeramente superior en los hormigones reciclados que en los convencionales, evolucionando todos los hormigones de manera similar entre 28 y 365 días.

De nuevo se ha detectado, tanto en resistencia a compresión como en tensiones de adherencia, que los hormigones de la serie H50 acusan una influencia del árido reciclado ligeramente superior que los de la serie H65.

Con el fin de conocer la influencia del árido reciclado en la tensión de adherencia máxima, se ha normalizado ésta con  $\sqrt{f_c}$ , ( $\tau_{m\acute{a}x}/\sqrt{f_c}$ ). También en este caso, se puede observar que la tensión de adherencia máxima disminuye cuando crece el contenido de árido reciclado.

De esta forma se ha propuesto un factor exclusivamente dependiente del porcentaje de árido reciclado para corregir las expresiones que, en las distintas normas y códigos, proporcionan valores de la tensión de adherencia máxima para los hormigones convencionales. Con ello se consigue predecir esta tensión de adherencia en los hormigones reciclados con la misma ratio “tensión de adherencia experimental/ tensión de adherencia teórica” que en los convencionales. Además, es de esperar que, dado que la longitud de anclaje es inversamente

proporcional a la tensión de adherencia, deba incrementarse la primera a la par que la segunda disminuye.

$$\tau_{m\acute{a}x} = 2.5 \sqrt{f_c} (1 - 0.124 \%RCA) \quad (VII-3)$$

Una vez analizada la influencia del árido reciclado en la tensión de adherencia máxima, se ha estudiado el modo en que lo hace sobre la forma de la curva tensión de adherencia – deslizamiento. Para ello se ha calculado la tensión de adherencia unitaria a partir del valor máximo registrado durante el ensayo ( $\tau/\tau_{m\acute{a}x}$ ), definiéndose así la curva tensión de adherencia unitaria-deslizamiento. El análisis de estas curvas permite observar que, para cualquier valor de deslizamiento, incrementos en el porcentaje de árido grueso reciclado empleado producen disminuciones de la tensión de adherencia unitaria, o lo que es lo mismo, los valores de deslizamiento obtenidos para cualquier valor de tensión de adherencia unitaria son mayores en los hormigones reciclados que en los convencionales y aumentan cuando crece el porcentaje de sustitución. Este efecto se acentúa para deslizamientos pequeños lo que repercute sobre el comportamiento adherente en servicio de los hormigones reciclados. Esto supone, por tanto, la necesidad de modificar las expresiones normativas que modelizan las curvas tensión de adherencia – deslizamiento.

Finalmente, de modo análogo al seguido en el caso de la tensión de adherencia máxima, se ha calibrado la corrección que debe aplicarse sobre la expresión (VII-4) para generalizarla al caso de los hormigones con áridos reciclados (VII-5) y obtener así el mismo grado de aproximación de la curva tensión adherente – deslizamiento en hormigones reciclados que en los convencionales.

$$\begin{aligned} \tau_b &= \tau_{\max} s^{0.431} & \left\{ \begin{array}{l} \text{para } 0 \geq s > 1 \text{ mm} \\ \%RCA \leq 20 \end{array} \right. \\ \tau_b &= \tau_{\max} s^{(0.429+0.0001\%RCA)} & \left\{ \begin{array}{l} \text{para } 0 \geq s > 1 \text{ mm} \\ 20 < \%RCA \leq 100 \end{array} \right. \\ \tau &= \tau_{\max} & \text{para } s \geq 1 \text{ mm} \end{aligned} \quad (VII-5)$$



---

# VIII. CONCLUSIONES

# CONCLUSIONS

---

## 1 CONCLUSIONES

El programa experimental llevado a cabo para el desarrollo de esta tesis doctoral permite obtener las siguientes conclusiones.

### 1.1 Caracterización del hormigón

#### 1.1.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas del hormigón (consistencia, densidad y absorción) se ven afectadas por el porcentaje de sustitución del árido grueso natural por reciclado en tanto que la densidad disminuye y la absorción crece.

Para conseguir una consistencia adecuada sería necesario, un control riguroso en el proceso de amasado, a fin de controlar la relación a/c efectiva.

#### 1.1.2 Resistencias mecánicas y módulo de deformación

Se constata la influencia de la absorción y la cantidad de árido reciclado en las propiedades mecánicas (resistencias y módulo de deformación) de los hormigones

## 1 CONCLUSIONS

The experimental program carried out in order to develop this PhD dissertation let the researchers obtain the following conclusions.

### 1.1 Concrete characterization

#### 1.1.1 Physical properties

The concrete physical properties (consistence, density and absorption) are affected by the replacement percentage of recycled coarse aggregate. The density decreases and the water absorption increases with the percentage of replacement.

In order to obtain a suitable consistence, it is necessary to control accurately the casting process, with the aim of controlling the effective w/c relationship.

#### 1.1.2 Mechanical strengths and modulus of elasticity

The influence of water absorption and recycled aggregate content on the mechanical properties (strengths and modulus of elasticity) of recycled concretes is



recicladados. En concordancia con los resultados de otros autores, las resistencias a compresión, a tracción y el módulo de deformación disminuyen al crecer el porcentaje de árido empleado.

A 28 días, la resistencia a compresión de los hormigones fabricados íntegramente con árido grueso reciclado, presentaron reducciones del 28% y 31% para los H50 y H65, respectivamente.

Cabe destacar, además, que los hormigones de la serie H50 acusan, en general, una influencia del árido reciclado ligeramente superior en las resistencias a compresión y tracción que los de la serie H65, de mayor relación a/c y, por tanto, menor resistencia.

Finalmente, el módulo de deformación experimentó caídas del 29 y 32% en los hormigones fabricados con el 100% de árido grueso reciclado de la serie H50 y H65, respectivamente.

Se han ajustado sendos factores para corregir las expresiones normativas que estiman la resistencia a tracción y el módulo de deformación, consiguiéndose de este modo que sus predicciones sobre los hormigones reciclados alcancen el mismo grado de aproximación que sobre los convencionales (mismas ratios "*propiedad experimental/ propiedad teórica*"). Los dos factores incluyen el porcentaje de árido reciclado empleado (%RCA) como única variable y permiten estimar valores teóricos de  $f_{ct}$  y  $E_c$  a partir de cualquier expresión normativa (*Tabla VIII-1*).

### 1.1.3 Diagrama tensión - deformación

La presencia de árido reciclado influye significativamente en las propiedades deformacionales de los hormigones, hecho que se traduce en una curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  más tendida con mayores deformaciones de pico y última en los hormigones reciclados. Este efecto puede atribuirse a la presencia de mortero adherido a los áridos y a la generación de una interfaz pasta-árido más deformable.

noticeable. According to other authors' results, the compressive and tensile splitting strength, and modulus of elasticity decrease when the percentage of recycled aggregate increases.

At 28 days, the compressive strength of 100% recycled coarse aggregate concretes, showed reductions of 28% and 31% for H50 and H65, respectively.

Concerning tensile splitting strength ( $f_{ct}$ ), slightly scatters were obtained. However, it has been measured a decrease of 48% for H50-100 and of 42% for H65-100.

It is noteworthy that H50 concretes show generally, a slightly higher influence of recycled coarse aggregate on the compressive and tensile splitting strength than H65 concretes, which have higher w/c relationship and thus, lower strengths.

Finally, the modulus of elasticity of recycled concretes underwent decreases of 29 and 32% on H50-100 and H65-100, respectively.

In order to predict the tensile splitting strength and modulus of elasticity of recycled concretes using standard expressions, two factors have been adjusted aiming to provide similar approximation between recycled concrete predictions and conventional ones (the same ratio "*experimental property/ theoretical property*"). Both factors include the replacement percentage of recycled coarse aggregate (%RCA) as the only variable allowing the researchers to predict theoretical values for  $f_{ct}$  and  $E_c$  using the expression of any of the codes studied (*Tabla VIII-1*).

### 1.1.3 Stress- strain curve

The recycled coarse aggregate content has a significant influence on the strain properties of concretes. This fact provides a lower slope in the  $\sigma$  -  $\varepsilon$  curve with higher strain at peak stress and ultimate strain for recycled concretes. This effect can be attributed to attached mortar and the weak paste-aggregate interface.

En las series H65 y H50 con el 100% de sustitución se constataron incrementos en la deformación de pico respecto del convencional del 18 y 23%, respectivamente. Los incrementos detectados para el caso de la deformación última fueron del 18% para el H65-100 y del 21% para el H50-100.

De nuevo, la serie H50 acusa una mayor influencia del árido reciclado en su diagrama tensión-deformación que la H65.

Se ha calculado, por último, un factor exclusivamente dependiente del porcentaje de árido reciclado para corregir las expresiones que, en las distintas normas y códigos, proporcionan valores de la deformación de pico y última para los hormigones convencionales. Con ello se consigue predecir ambas deformaciones en los hormigones reciclados con la misma ratio “*deformación experimental/ deformación teórica*” que en los convencionales (Tabla VIII-1).

#### 1.1.4 Retracción

En los hormigones reciclados aumenta la deformación de retracción, respecto a la de sus correspondientes hormigones de control, al crecer el porcentaje de sustitución del árido grueso. En los hormigones fabricados íntegramente con árido grueso reciclado, en ambas series de estudio, el aumento alcanza a 1000 días el 77% de la retracción que experimentan los hormigones convencionales.

Se ha observado, de nuevo, que los hormigones de la serie H50 acusan ligeramente más la incorporación del reciclado que los de la serie H65.

Se ha constatado un desarrollo más lento de la deformación de retracción en los hormigones fabricados con árido reciclado. La pre-saturación del árido grueso reciclado, origina, posiblemente, un exceso de agua en los hormigones reciclados que podría retrasar el inicio de la retracción. Este efecto, consecuencia del uso del árido reciclado pre-saturado, ya ha sido constatado por otros autores [CORI10] bajo la denominación de “curado interno” (internal curing).

The 100% recycled concretes show higher peak strain than conventional ones, showing an 18% increase of H50-100 and 23% increase of H65-100. Regarding ultimate strain, the increments were 18% for H65-100 and 21% for H50-100.

Again, the stress-strain curve of H50 series was more influenced by aggregate than H65.

Finally, a factor was calculated taking into account only the replacement percentage of recycled concrete, in order to correct the expressions that, in different standards and codes, provide values for strain at peak stress and ultimate strain in conventional concretes. With this correction, both strains can be predicted for recycled concretes with the same ratio “experimental strain/ theoretical strain” than conventional ones (Tabla VIII-1).

#### 1.1.4 Shrinkage

Shrinkage of recycled concretes increases with the replacement percentage of recycled coarse aggregate compared with the conventional one. At 1000 days, concretes made with 100% recycled coarse aggregate of both series show 77% higher shrinkage strain than conventional concretes.

Again, it was observed that H50 concretes show an influence of recycled aggregates content slightly higher than H65 series.

It was shown a delay on the development of shrinkage strain of recycled concretes. This effect is due to the use of pre-wet recycled aggregates, which produces the phenomena called by other authors “internal curing”. As a result, recycled concretes show a delayed onset of shrinkage.

Con el fin de mantener las ratios “retracción experimental/ retracción teórica” similares a las obtenidas en los hormigones convencionales, se deberá introducir un coeficiente corrector para la estimación de la deformación de retracción en hormigones reciclados con distinto porcentaje de sustitución. Además, para tener en cuenta el desarrollo más lento de la deformación de retracción en los hormigones fabricados con árido pre-saturado este coeficiente adoptará valores diferentes con la edad

Mediante regresión multivariable se ha ajustado la expresión que, en función del porcentaje de árido reciclado empleado (%RCA, en tanto por uno) y la edad del hormigón (t, en días), permite calcular el coeficiente corrector que debe aplicarse en cada instante a la ecuación normativa de cálculo de la retracción para mantener la misma ratio “retracción teórica/ retracción experimental” en hormigones convencionales y en hormigones reciclados (Tabla VIII-1).

#### 1.1.5 Fluencia

Con el objetivo de conocer la influencia del árido reciclado en las deformaciones bajo carga sostenida, se han calculado las deformaciones de fluencia por unidad de tensión (fluencia unitaria) y los coeficientes de fluencia para cada uno de los hormigones de estudio.

La fluencia unitaria en hormigones reciclados es mayor que en los convencionales, incrementándose para el 100% de sustitución un 51% y 73% respecto a los hormigones de control en las series H50 y H65, respectivamente.

Los hormigones de la serie H50 presentan coeficientes de fluencia muy similares, a excepción del H50-100 que experimenta un aumento del 30% respecto al obtenido para el hormigón de control. En los hormigones de la serie H65 el coeficiente de fluencia aumenta ligeramente con porcentajes de sustitución del árido grueso natural por reciclado, siempre que éste sea inferior al 50%, y en un 43% para el H65-100.

Finally, a function depending on the replacement percentages was calculated in order to predict the shrinkage strain of conventional and recycled concretes with the same ratio “*experimental shrinkage/ theoretical shrinkage*”. In addition, aiming to take into account the delay on the development of shrinkage of recycled concretes this function has to include a time-dependent term.

The function was adjusted by multivariable regression taking into account the replacement percentage of recycled aggregate (%RCA, 0.2-1) and the concrete age (t, days). This adjustment led to calculate the coefficient at any age that provides the same ratio “*experimental shrinkage/ theoretical shrinkage*” on recycled and conventional concretes (Tabla VIII-1).

#### 1.1.5 Creep

In order to know the recycled aggregate influence on long-term deformation (under sustained load), the specific creep (creep strain/tension) and the creep coefficient ( $\phi$ ) of studied concretes have been calculated.

Specific creep of recycled concretes is higher than the one of conventional ones. Compared to control concrete (replacement percentage of 0%) the specific creep underwent increases of 51% and 73% for H50-100 and H65-100, respectively.

The concretes of series H50 have similar creep coefficients except for the H50-100, which showed an increase of 30% compared to the creep coefficient of conventional concrete. Regarding concretes H65, the creep coefficient increases slightly when the replacement percentage of recycled coarse aggregate is up to 50%, again H65-100 shows higher difference. The creep coefficient ( $\phi$ ) of H65-100 is 43% higher than that of the H65-0.

Del análisis de la necesidad de correcciones para la predicción de los coeficientes de fluencia de acuerdo a las diferentes normativas, se concluye que a edades elevadas (por encima de 90 días) el hecho de emplear la resistencia a compresión experimental y el módulo de deformación teórico corregido según el porcentaje de árido reciclado presente en cada hormigón mantiene prácticamente constantes las ratios “coeficiente  $\phi$  experimental/ coeficiente  $\phi$  teórico” con independencia del porcentaje de sustitución empleado. Sin embargo, de nuevo el efecto del “Internal Curing” hace que el coeficiente de fluencia a edades tempranas presente una evolución diferente en hormigones reciclados que en los convencionales. En este caso, este efecto retrasa el desarrollo de las resistencias, haciendo que los hormigones reciclados a edades tempranas presenten una mayor deformabilidad.

De esta forma, para conseguir el mismo nivel de precisión entre los hormigones convencionales y los reciclados deberá ajustarse un coeficiente corrector para la estimación de la deformación de fluencia que, especialmente, tenga en cuenta el mayor desarrollo de la misma en estos hormigones a edades inferiores a 90 días de edad.

Se realiza el ajuste del coeficiente corrector mediante regresión multivariable obteniéndose una expresión función, únicamente, de la edad ( $t$ , edad del hormigón y  $t_0$  edad de carga) e independiente del porcentaje de árido reciclado empleado. Este coeficiente debe aplicarse en cada instante a la ecuación normativa de cálculo de la fluencia en hormigones reciclados para tener en cuenta el retraso en el desarrollo de las resistencias de los mismos (*Tabla VIII-1*).

Creep coefficients of recycled concretes were calculated according to different codes. This analysis led to conclude that, the use of the experimental compressive strength and the modulus of elasticity corrected by the previously proposed expression, provide similar ratios “experimental  $\phi$ / theoretical  $\phi$ ” on the studied concretes, not depending on the replacement percentage used. However, at early ages, the “internal curing” effect led to different time-dependent development of creep coefficients on recycled concretes. This effect causes a delay onset of strengths development on recycled concretes, resulting in more deformable concretes at early ages.

Again, the creep coefficients were calculated by different code expressions. Aiming to obtain the same accurate prediction on recycled concretes and conventional ones, even during internal curing effect (up to 90 days), a corrector function has to be introduced.

In order to consider the higher growth of creep strain of recycled concretes, a function was adjusted by multivariable regression, taking into account the concrete age ( $t$ ) and the loading time ( $t_0$ ), with no influence of different replacement percentages. This time-dependent function led to calculate the creep of recycled concretes bearing in mind the delay onset of strengths development (*Tabla VIII-1*).

Propiedad	Corrección propuesta
<b>Resistencia a tracción</b> <b>Tensile splitting strength</b>	$f_{ct} = f_{ct,normativa}(1 - 0.22 \%RCA)$
<b>Módulo de deformación</b> <b>Modulus of elasticity</b>	$E_c = E_{c,normativa}(1 - 0.24 \%RCA)$
<b>Deformación de pico</b> <b>Peak strain</b>	$\varepsilon_{c0} = \varepsilon_{c0,teórico} (1 + 0.35 \%RCA)$
<b>Deformación última</b> <b>Ultimate strain</b>	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu,teórico} (1 + 0.22 \%RCA)$
<b>Retracción</b> <b>Shrinkage</b>	$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh,normativa}(1 + 0.44\%RCA) \left( e^{0.01\%RCA \left[ 1 - \left( \frac{90}{t} \right)^{(1.82 - 1.04\%RCA)} \right]} \right)$
<b>Coefficiente de fluencia</b> <b>Creep coefficient</b>	$\varphi = \varphi_{normativa} \left( e^{0.05 \left[ \left( \frac{90 - t_0}{t - t_0} \right) \right]} - 1 \right)$

Tabla VIII-1. Factores de corrección propuestos para la estimación de las propiedades en hormigones

## 1.2 Flexión bajo cargas incrementales

A partir del análisis a flexión bajo cargas incrementales se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Las deformaciones de la armadura de tracción y compresión de la sección central confirman que la rotura se ha producido por la plastificación del acero en todas las vigas. El comportamiento dúctil de las vigas se confirma, también, con la prolongación de la rama plástica observada en los diagramas momento – curvatura de todos los hormigones.
- Se han constatado curvaturas ligeramente superiores en los hormigones reciclados que en los hormigones de control, asociadas menor módulo de deformación de los primeros. Esto es especialmente notable en hormigones con el 100% de sustitución, con incrementos del 28% y del 14% para las series H50 y H65, respectivamente.

Para el análisis de solicitaciones se definieron los siguientes momentos singulares de estudio: momento de fisuración ( $M_{fis}$ ), momento de plastificación ( $M_{plast}$ ), momento máximo ( $M_{máx}$ ), momento de servicio ( $M_{serv} = 30.22$  kNm) y momento

## 1.2 Short-term analysis

Short-term analysis of flexural beam tests let us to obtain the following conclusions:

- Steel strain in the cross-section of the beams led to confirm ductile failure due to steel yielding in all beams. The post-yielding branch length of the moment-curvature diagrams also confirms the ductile beams behaviour.
- Recycled concretes underwent higher curvatures than conventional ones due to lower modulus of elasticity. This is especially significant for H50-100 and H65-100, with increases of 28% and 14%, respectively.

Different characteristic moments were defined: cracking moment ( $M_{fis}$ ), yielding moment ( $M_{plast}$ ), ultimate moment ( $M_{máx}$ ), service moment ( $M_{serv} = 30.22$  kNm) and moment ( $M_{L350}$ ) associated to a deflection of 9.71 mm ( $L/350 = 9.71$  mm maximum deflection established by Spanish building code, CTE). The conclusions are as follows:

( $M_{L350}$ ) asociado a la flecha máxima admitida en el CTE ( $L/350$  igual en este caso a 9.71 mm). Las conclusiones alcanzadas con este análisis han sido las siguientes:

- El momento de fisuración disminuye con el porcentaje de árido reciclado empleado, en concordancia con las disminuciones de la resistencia tracción, de la que depende directamente. El  $M_{L350}$  experimenta pequeñas reducciones cuando el porcentaje de sustitución es elevado, consecuencia de la mayor deformabilidad de los hormigones reciclados de menor módulo que los convencionales. Finalmente, el dimensionamiento de las vigas para obtener roturas dúctiles supone que el hormigón tiene una contribución limitada en rotura, lo que hace que los momentos de plastificación y máximo apenas se vean afectados por la presencia de árido reciclado.
- La disminución del momento de fisuración y el mantenimiento de los de plastificación y máximo implica que en los hormigones reciclados se produce una fisuración prematura.
- A partir de las ratios "*momento experimental/ momento teórico*", similares en hormigones reciclados y convencionales, se constata que es innecesario introducir correcciones en la metodología de cálculo de momentos propuesta en las normativas para tener en cuenta la presencia de árido reciclado. Las correcciones sugeridas para las propiedades mecánicas (módulos de deformación, resistencia a tracción o deformaciones de pico y últimas) utilizadas este cálculo y el uso de la resistencia a compresión experimental, son suficientes para la correcta estimación de los momentos de referencia analizados.
- The cracking moment decreases as the replacement percentage increases according to the drop of tensile splitting strength, due to the fact that cracking moments depends on tensile splitting strengths.
- The  $M_{L350}$  moment shows small reductions when the replacement percentage increases due to higher deformability and lower modulus of elasticity of recycled concretes.
- The ductile beams behaviour shows that the concrete has a limited contribution on failure, as a result, the recycled aggregate content affects barely to yielding and maximum moments.
- The decrease of cracking moment and the invariability of yielding and maximum moments indicates an early cracking development on recycled concretes.
- The ratio "*experimental moment/ theoretical moment*" of recycled concretes are both similar in recycled and conventional concretes and shows that the coefficient corrector to predict these moments is 1. Thus, the use of experimental compressive strength and concrete properties (modulus of elasticity and tensile splitting strength) corrected by the previously proposed expression are accurate enough to predict cracking moments, using the code proposals.

In the same way different characteristic deflections were defined: cracking deflection ( $f_{fis}$ ), yielding deflection ( $f_{Mplast}$ ), deflection associated to ultimate moment ( $f_{Mmáx}$ ) and deflection associated to service moment ( $f_{Mserv}$ ). The conclusions are as follows:

Para el análisis de flechas se han utilizado, además de los diagramas momento – flecha, los siguientes valores experimentales de

referencia: flecha correspondiente al momento de fisuración ( $f_{Mfis}$ ), flecha correspondiente al momento de plastificación ( $f_{Mplast}$ ), flecha correspondiente al momento máximo ( $f_{Mmáx}$ ) y flecha correspondiente al momento de servicio ( $f_{Mserv}$ ). Las conclusiones alcanzadas con este análisis han sido las siguientes:

- Las flechas aumentan, aunque muy ligeramente, para porcentajes de sustitución por encima del 20%. Como en el caso de las curvaturas, el desarrollo de las flechas guarda relación con la deformabilidad del hormigón empleado. Así, la sensible reducción del módulo cuando el porcentaje de sustitución es del 100% supone incrementos de la flecha en servicio del 11% y del 9% para las series H65 y H50, respectivamente.
- Los resultados obtenidos del análisis de las ratios "*flecha teórica/ flecha experimental*" indican, una vez más, que para tener en cuenta la presencia de árido reciclado es innecesario introducir correcciones en el método de cálculo de flechas propuesto en las normativas. De nuevo, las correcciones sugeridas para las propiedades mecánicas utilizadas en el cálculo de las mismas (módulos de deformación) y el uso de la resistencia a compresión experimental, son suficientes para su correcta estimación en hormigones reciclados.

### 1.3 Flexión bajo carga sostenida

En el análisis de solicitaciones se definieron los momentos de fisuración ( $M_{fis}$ ) y de carga ( $M_Q$ ) en cada una de las vigas. Al igual que en el estudio bajo cargas incrementales se constató que el momento de fisuración disminuye al aumentar el porcentaje de árido reciclado empleado, en concordancia con las disminuciones de la resistencia a tracción, de la que depende directamente.

- The deflections increase slightly on concretes with replacement percentages higher than 20%. The deflections development is related with the deformability of concretes. So, the reduction of modulus of elasticity of recycled concretes led to an increase of service deflection of 11% and 19% for H65-100 and H50-100, respectively.
- The ratios "*experimental deflection/ theoretical deflection*" are both similar in recycled and conventional concretes. Again, the use of experimental compressive strength and concrete properties corrected by the previously proposed expression considering %RCA are accurate enough for the prediction of deflections on recycled concretes.

### 1.3 Long-term analysis

As short-term analysis, cracking moment ( $M_{fis}$ ) and moment associated to the sustained load ( $M_Q$ ) were defined. Again, it was noted that cracking moment decreases as the replacement percentage increases according to the drop of tensile splitting strengths, due to the fact of the cracking moment depends on them.



### 1.3.1 Análisis de deformaciones

Se constata que en los 200 primeros días de carga se desarrollan la mayor parte de las deformaciones, tanto en hormigones reciclados como convencionales, tendiendo a estabilizarse a partir de ese momento.

Analizando las deformaciones en la cabeza de compresión de la viga, se desarrollan mayores deformaciones por unidad de tensión en hormigones con árido reciclado que en hormigones convencionales. La deformación diferida unitaria revela una significativa influencia del contenido de árido reciclado sobre el comportamiento de los hormigones de estudio: para el hormigón que sustituye el 100% del árido grueso natural por reciclado se registran incrementos, respecto al hormigón de control, del 34% y 87% en las series H50 y H65 respectivamente.

Se constató además, que la presencia de armadura en las vigas coacciona la libre deformación del hormigón, lo que supone el desarrollo de menores deformaciones que en las probetas, tanto en hormigones reciclados como convencionales.

### 1.3.2 Análisis de flechas

Los valores de la flecha diferida unitaria revelan una significativa influencia del contenido de árido reciclado sobre el comportamiento de los hormigones estudiados. Respecto a los hormigones patrón de la serie H65, a 1000 días se constatan incrementos en la misma del 21%, 29% y 76% para sustituciones del 20%, 50% y 100% respectivamente. En la serie H50 el incremento medido es del 18%, 34% y 72% respectivamente para los mismos porcentajes de sustitución. Se observa, también que, al igual que con las deformaciones unitarias, la flecha diferida unitaria aumenta en los hormigones reciclados de mayor relación a/c (H65 frente a H50). Las mayores flechas diferidas de los hormigones reciclados también se constatan

### 1.3.1 Strain analysis

The recycled and conventional concretes developed most of the strain during the first 200 days. From that day on, the strain curves tended to stabilise.

Analysing compression chord strains on cross-section of the beams, they were noted higher specific strains (strain/tension) on recycled concretes than on conventional ones. The recycled aggregate content influences significantly on the specific long-term strain ( $\epsilon_{dif}/\text{tension}$ , with  $\epsilon_{dif}(t) = \epsilon(t) - \epsilon(t_0)$ ) of concretes. Compared to conventional concrete, the specific long-term strain of H50-100 and H65-100 increases a 34% and an 87%, respectively.

In addition, the beams reinforcement restrains the free concrete strain, resulting in lower deformations on beams (reinforced concrete) than on cylinders specimens (plain concrete) of both recycled and control concretes.

### 1.3.2 Deflections analysis

The recycled aggregate content influences significantly on the specific long-term deflection of the analysed concretes. Compared to control concrete of H65 series, at 1000 days, it can be seen that the specific long-term deflection increases a 21%, 29% and 76% for 20, 50 and 100% of replacement percentages, respectively. In the same way, in H50 series it showed increments of 18%, 34% and 72%, for H50-20, H50-50 and H50-100. This effect can also be seen in the higher ratio "*long-term deflection/ short-term deflection*" of recycled concretes than of control concretes, at different ages. Finally, as specific long-term strains, it was also observed that specific long-term deflection is higher in the recycled concretes with high w/c ratio (H65 more than H50).



a través de la mayor relación entre la flecha diferida y la instantánea en el tiempo.

Del análisis (a partir de 60 días de carga) de la necesidad de correcciones para la predicción de flechas diferidas de acuerdo a las diferentes normativas, se concluye que para conseguir el mismo nivel de precisión entre los hormigones convencionales y los reciclados (mismas ratios “*flecha diferida experimental/ flecha diferida teórica*”) deberá ajustarse un coeficiente corrector que, además, adoptará valores diferentes según se opte por realizar las estimaciones mediante las propuestas de la norma española [EHE-08] y americana [ACI318] o mediante las de las demás expresiones analizadas [MARÍ10; EC-2; MC-10].

Para cada grupo de propuestas se ha realizado el ajuste del coeficiente corrector mediante regresión, obteniéndose el valor de 1.27 y 1.14 para el grupo [EHE-08, ACI318] y [MARÍ10; EC-2; MC-10] respectivamente (VIII-1) para cualquier porcentaje de sustitución empleado. Estos coeficientes deben aplicarse en cada instante a las correspondientes ecuaciones normativas de cálculo de la flecha diferida para tener en cuenta la incorporación de árido reciclado.

## 1.4 Comportamiento adherente

La evolución temporal de la resistencia a compresión en hormigones convencionales y reciclados es diferente, especialmente a edades tempranas. Así, a 3 días los hormigones reciclados han alcanzado el 64% de la de 28 días, mientras que el hormigón convencional presenta ya un desarrollo del 74%. A 7 días el porcentaje en hormigones reciclados asciende hasta el 85%, mientras que los convencionales alcanzan el 90%. Finalmente a 90 días mientras los hormigones convencionales desarrollan sólo un 1.5% más sus resistencias, los reciclados lo hacen en un 4%.

According to code expressions, long-term deflections were predicted at different ages, and in order to determine the suitability of proposing corrector coefficients to this expressions, the ratios “*experimental long-term deflection/ theoretical long-term deflection*” were obtained. As a result, it was noted that to maintain the same ratios in conventional and recycled concretes a corrector factor is necessary. This factor will be different depending on the code used to predict the long-term deflection, Spanish and American Codes [EHE-08; ACI318] (both use similar procedure) or the other considered expressions, which include creep and shrinkage effects [MARÍ10; EC-2; MC-10].

Finally, the proposed factor was adjusted by regression, being 1.27 if the Spanish and American Code [EHE-08, ACI318] are used and 1.14 when any of the other considered expressions are employed [MARÍ10; EC-2; MC-10] (VIII-1). These coefficients multiply code expressions in order to obtain the long-term deflection of recycled concretes at different ages.

$$f_{dif,rec} = 1.27 f_{dif,EHE-08} \quad (VIII-1)$$

$$f_{dif,rec} = 1.14 f_{dif,EC-2}$$

## 1.4 Bond behaviour

Time-dependent compressive strength of recycled concretes is different to that obtained with conventional concrete. At 3 days, recycled concretes reach the 64% of the compressive strength at 28 days ( $f_{c,28d}$ ), while the conventional concrete has already developed the 74% of  $f_{c,28d}$ . At 7 days, this development has reached the 85% for recycled concretes and the 90% for conventional ones. Finally, at 90 days conventional concretes grow up a 1.5% compared with  $f_{c,28d}$ , while recycled concretes increase a 4% its  $f_{c,28d}$ .

La tensión de adherencia máxima en los hormigones reciclados es inferior a la de los hormigones convencionales de igual dosificación y, además, disminuye, en porcentajes similares a cómo lo hace la resistencia a compresión, al crecer el porcentaje de árido grueso reciclado empleado.

La evolución temporal de la tensión de adherencia es similar a la de la resistencia a compresión. Entre 7 y 28 días se constata un crecimiento ligeramente superior en los hormigones reciclados que en los convencionales, evolucionando todos los hormigones de manera similar entre 28 y 365 días.

De nuevo se ha detectado, tanto en resistencia a compresión como en tensiones de adherencia, que los hormigones de la serie H50 acusan una influencia del árido reciclado ligeramente superior que los de la serie H65.

Con el fin de conocer la influencia del árido reciclado en la tensión de adherencia máxima, se ha normalizado ésta con  $\sqrt{f_c}$ , ( $\tau_{m\acute{a}x}/\sqrt{f_c}$ ). También en este caso, se puede observar que la tensión de adherencia máxima disminuye cuando crece el contenido de árido reciclado.

De esta forma se ha propuesto un factor exclusivamente dependiente del porcentaje de árido reciclado para corregir las expresiones que, en las distintas normas y códigos, proporcionan valores de la tensión de adherencia máxima para los hormigones convencionales. Con ello se consigue predecir esta tensión de adherencia en los hormigones reciclados con la misma ratio "tensión de adherencia experimental/ tensión de adherencia teórica" que en los convencionales (VIII-2). Además, es de esperar que, dado que la longitud de anclaje es inversamente proporcional a la tensión de adherencia, deba incrementarse la primera a la par que la segunda disminuye.

The bond strength of recycled concretes is lower than the one of the conventional concretes with the same dosage, and it declined with the increase of recycled aggregate content showing a behaviour similar to compressive strength.

The time-dependent development of bond strength followed the same trend as compressive strength. From 7 to 28 days, recycled concretes underwent a slightly higher increase than conventional ones. From 28 to 365 days, bond strength variation was barely noticeable for both concrete series.

Again, both compressive and bond strength shows that H50 series are slightly more influenced by recycled aggregate than H65 series.

In order to know the influence of recycled concrete on bond strength, normalized bond strength was calculated taking into account the square root of the experimental compressive strength ( $\tau_{m\acute{a}x}/\sqrt{f_c}$ ). Also in this case, bond strength decreases as the recycled aggregate content increases.

Using these experimental results, a modified expression was proposed to predict the maximum bond stress of the recycled concretes. This equation, based on MC-2010 expression, includes a new term to take into account the replacement percentage of recycled aggregates and to guarantee an "experimental value to theoretical prediction" ratio similar to that of conventional concretes (VIII-2). In addition, it can be expected that bond strength increases as anchorage length decreases, due to bond strength is inversely related to anchorage length.

$$\tau_{m\acute{a}x} = 2.5 \sqrt{f_c} (1 - 0.124 \%RCA) \quad (VIII-2)$$

Una vez analizada la influencia del árido reciclado en la tensión de adherencia máxima, se ha estudiado el modo en que lo hace sobre la forma de la curva tensión de adherencia –deslizamiento. Para ello se ha calculado la tensión de adherencia unitaria a partir del valor máximo registrado durante el ensayo ( $\tau/\tau_{\max}$ ), definiéndose así la curva tensión de adherencia unitaria-deslizamiento. El análisis de estas curvas permite observar que, para cualquier valor de deslizamiento, incrementos en el porcentaje de árido grueso reciclado empleado producen disminuciones de la tensión de adherencia unitaria, o lo que es lo mismo, los valores de deslizamiento obtenidos para cualquier valor de tensión de adherencia unitaria son mayores en los hormigones reciclados que en los convencionales y aumentan cuando crece el porcentaje de sustitución. Este efecto se acentúa para deslizamientos pequeños lo que repercute sobre el comportamiento adherente en servicio de los hormigones reciclados. Esto supone, por tanto, la necesidad de modificar las expresiones normativas que modelizan las curvas tensión de adherencia –deslizamiento.

Finalmente, de modo análogo al seguido en el caso de la tensión de adherencia máxima, se ha calibrado la corrección que debe aplicarse sobre la expresión normativa para generalizarla al caso de los hormigones con áridos reciclados (VIII-3) y obtener así el mismo grado de aproximación de la curva tensión adherente – deslizamiento en hormigones reciclados que en los convencionales.

In order to analyse the influence of recycled aggregate on the shape of bond stress– slip curve, unitary bond stress ( $\tau/\tau_{\max}$ ) was calculated using the corrected bond strength ( $\tau_{\max}$ ) according to (2). The analysis of unitary bond stress-slip curves led to observe that an increment in the recycled aggregate content causes a reduction in the unitary bond stress. Thus, slip values at a fixed unitary bond stress are higher in recycled concretes and increase as the replacement percentage increase. This effect is especially significantly at low slips, which affect mainly to bond behaviour of recycled concretes at service state. It is thus necessary to modify the code expressions in order to obtain an accurate prediction of bond stress– slip curve.

Finally, in order to obtain the same accurate prediction of stress– slip curve for both recycled and conventional concretes the correction expression was calculated according to Model Code proposal (VIII-3).

$$\begin{aligned}
 \tau &= \tau_{\max} s^{0.431} & \left\{ \begin{array}{l} \text{para } 0 \leq s < 1 \text{ mm} \\ \%RCA \leq 20 \end{array} \right. \\
 \tau &= \tau_{\max} s^{(0.429+0.0001\%RCA)} & \left\{ \begin{array}{l} \text{para } 0 \leq s < 1 \text{ mm} \\ 20 < \%RCA \leq 100 \end{array} \right. & (VIII-3) \\
 \tau &= \tau_{\max} & \text{para } s \geq 1 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

---

## IX. BIBLIOGRAFÍA

---

- [ACHE00] ASOCIACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA DEL HORMIGON ESTRUTURAL (ACHE), grupo de trabajo 2/1. "Armaduras pasivas en la instrucción EHE"; Monografía 1; Junio 2000
- [ACHE06] ASOCIACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA DEL HORMIGON ESTRUTURAL (ACHE), Grupo de trabajo 2/5. "*Utilización del árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural*"; Monografía 11; 2006
- [ACI-08] ACI 318. "*Building code requirements for structural concrete and commentary*" American Concrete Institute; Michigan: Farmington Hills, 2008
- [AGUA03] AGUADO A., BARRA M., GÓMEZ-SOBERÓN J.M., GONZÁLEZ B. "*Potencialidades del hormigón estructural y su tecnología en el marco de la sostenibilidad de la construcción*" 2003
- [AJDU02] AJDUKIEWICZ A., KLISZCZEWICZ A. "*Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC*" Cement Concrete Composite; 24, pp.269-279, 2002
- [ALME08] ALMEIDA FILHO F.M, EL DEBS M.K, EL DEBS A.L.H.C. "*Bond-slip behavior of self-compacting concrete and vibrated concrete using pull-out and beam tests*" Materials and Structures; 41; pp.1073-1089, 2008
- [BAZA77] BAŽANT ZP, ASGHARI A. "*Constitutive law for nonlinear creep of concrete*". ASCE J.Eng.Mech. 103 (EM1); pp: 113-124; 1977
- [BAZA79] BAŽANT ZP, KIM SS. "*Nonlinear creep of concrete-adaptation and flow*" ASCE J.Eng.Mech. 105 (EM3); pp: 429-446; 1979
- [BAZA82] BAŽANT ZP, WITTMANN FH. "*Creep and shrinkage in concrete structures*" Chichester: John Wiley & Sons; 1982
- [BAZA94] BAŽANT ZP, XI Y. "*Drying creep of concrete: constitutive model and new experiments separating its mechanisms*." Materials and Structures; 27; pp.3-14, 1994

- [BCSJ77] BCSJ, Proposed Standard for the: *"Use of recycled aggregate and recycled aggregate concrete"* Building Constructors Society of Japan committee on disposal and reuse of construction waste (English version published in June 1981), May 1977
- [BERN09] BERNDT, A. *"Recycled Concrete as a Source of Aggregate"*; ACI Journal Vol 74, n°5; pp. 212-219, Mayo 2009
- [BRAN77] BRANSON, D.E. *"Deformation of Concrete Structures Recycled"*; ACI Journal McGraw- Hill. New York, 1977
- [BRIT10] BRITO J., ALVES F. *"Concrete with recycled aggregates: the Portuguese experimental research"* Materials and Structures; 43; pp.35-51, 2010
- [BUCK77] BUCK, A. *"Recycled Concrete as a Source of Aggregate"*; ACI Journal; 74, n°5; pp. 212-219, Mayo 1977
- [BUTL11] BUTLER L., WEST J.S., TIGHE S.L. *"The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement"* Cement and Concrete Research; 41; pp. 1037-1049, 2011
- [BUTL12] BUTLER L: *"Evaluation of Recycled Concrete Aggregate Performance in Structural Concrete"* PhD dissertation University of Waterloo, Ontario, Canada, 2012
- [CAIR03] CAIRNS J, PLIZZARI GA. *"Towards a harmonised European bond test."* Materials and Structures; 36; pp.498-506, 2003
- [CLEA11] IECA. *"Estudio Prenormativo Sobre la Utilización de Los RCDs en Hormigón Reciclado de Aplicación Estructural (Proyecto RECNHOR) y Reciclado de Los RCDs Como Áridos de Hormigones Estructurales (Proyecto CLEAM)"* IECA - Instituto Español Del Cemento y Sus Aplicaciones. 2011
- [CHOI10] CHOI HB, YI CK, CHO HH, KANG KI. "Experimental study on the shear strength of recycled aggregate concrete beams", Magazine of Concrete Research; Vol. 62 (2), p.p. 103-114, 2010
- [COLL06] COLLEPARDI M. *"The new concrete."* Grafiche Tintoretto; Chapters 15–16, pp: 235-267, 2006
- [CORI09] CORINALDESI V, MORICONI G. *"Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete."* Construction and building materials; 23; pp. 2869-2876, 2009
- [CORI10a] CORINALDESI V. *"Mechanical and elastic behavior of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates"*, Waste Management, 30, pp. 655-659, 2010
- [CORI10b] CORINALDESI V, MORICONI G: *"Recycling of rubble from building demolition for low-shrinkage concretes"*, Construction and Building Materials, 21, pp. 1616-1620, 2010
- [DAPE11] DAPENA, E, ALAEJOS, P, LOBET, A, AND PÉREZ, D. *"Effect of Recycled Sand Content on Characteristics of Mortars and Concretes."* J Mater Civ Eng 23(4):414–422, 2011, doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000183

- [DAVI40] DAVIS H.E. "Autogenous volume change of concrete" Proc. Of the 43<sup>rd</sup> Annual American Society for Testing Materials, ASTM, West Conshohocken, PA, 1103-1113, 1940
- [DEHN00] DEHN F, HOLSCHEMACHER K, WEIBE D. "Self-Compacting Concrete (SCC). Time development of the material properties and the bond behaviour." The Leipzig annual civil engineering report, Germany LACER, No. 5, pp. 115–24. 2000
- [DHIR99] DHIR RK, LIMBACHIYA MC, LEELAWAT T. "Suitability of recycled aggregate for use in BS 5328 designated mixes". Proc Inst Civil Eng; 134, pp. 257–274, 1999
- [DILL98] DILLMANN R. "Concrete with recycled concrete aggregate", Proceedings of international symposium on sustainable construction: use of recycled concrete aggregate, Dundee, Scotland; pp. 239–253, 1998
- [DINI98] DI NIRO G., CAIRNS R., DOLARA E. "Properties of Hardened RAC for Structural Purposes"; Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction; Edited Dhir, Henderson y Limbachiya; pp. 177-188, 1998
- [DOMI10] DOMINGO A., LAZARO C., GAYARRE F.L., SERRANO M.A., LOPEZ-COLINA C. "Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregates concrete." Materials and Structures 43: 1147-1160, 2010, doi: 10.1617/s11527-009-9573-0
- [DUAR10] DUARTE, N. "Cálculo simplificado de flechas instantáneas y diferidas en elementos a flexión de hormigón armado" Tesina de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña. 2010
- [EC-2] CEN En1992-1-1, "Eurocode2. Design of Concrete Structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings." European Committee Standard. Brussels, 2004
- [EHE-08] EHE-08, MINISTERIO DE FOMENTO: "Instrucción de Hormigón Estructural. EHE-08", 2008
- [ETXE04] ETXEBERRIA M. "Experimental Study on Microstructure and Structural Behaviour of Recycled Aggregate Concrete". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 2004
- [ETXE07] ETXEBERRIA M., VÁZQUEZ E, MARÍ A, BARRA M. "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete", Cement and Concrete Reserch; Vol. 37, p.p. 735-742, 2007
- [FATH09] FATHIFAZL G., RAZAQPUR A.G., ISGOR O.B., ABBAS A., FOURNIER B., FOO S. "Flexural performance of steel-reinforced recycled concrete beams", ACI Materials Journal; Vol. 106 (6), p.p. 858-867, March-April 2009
- [FATH11] FATHIFAZL G., RAZAQPUR A.G., ISGOR O.B., ABBAS A., FOURNIER B., FOO S. "Creep and drying characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate", Cement & concrete composites; 33, p.p. 1026-1037, 2011
- [FATH13] FATHIFAZL G., RAZAQPUR A.G. "Creep rheological models for recycled aggregate concrete", ACI Materials Journal; Vol. 110 (2), p.p. 115-125, March-April 2013

- [FAUR58] FAURY J. Le béton, 3.<sup>ème</sup> edition, Dunod Paris, 1958
- [FORO08] FOROUGH-ASL A., DILMAGHANI S., FAMILI H. "*Bond strength of reinforcement steel in self-compacting concrete.*" International Journal of Civil Engineering, 6; 2008
- [FRON77] FRONDISTOU-YANNAS; S.; "*Waste Concrete as Aggregate for New Concrete*"; ACI Journal, pp. 373-376, Agosto 1977
- [FUJI88] FUJII, T: "*Strengths and Drying Shrinkage Behavior of Concrete Using Concrete Crushed Aggregate*"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol.2 Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium; Ed. Y. Kasai; p.p. 660-669, Noviembre 1988
- [GERD10] GERD. "*Control de los residuos de construcción y demolición, RCD, en los ayuntamientos*", Noviembre 2010
- [GHAL02] GHALI A., FAVRE R., ELDBADRY M. "*Concrete structures. Stresses and deformation*" Taylor & Francis e-Library; 3<sup>rd</sup> edition, 2002
- [GILB11] GILBERT R.I., RANZI G. "*Time-dependent behaviour of concrete structures*" Taylor & Francis Spon press; 1<sup>st</sup> edition, 2011
- [GOEB85] GOEB, E: "*Pumping structural lightweight concrete*" Concrete Construction, Vol.30, nº6, p.p. 505-510, June 1985
- [GOME02] GOMEZ, J.M.V. "*Porosity of Recycled Concrete with Substitution of Recycled Concrete Aggregate. An Experimental Study*". Cement and Concrete Research, Vol 32, pp. 1301-1311, 2002
- [GONZ02] GONZÁLEZ FONTEBOA, B. "*Hormigones con Áridos Reciclados Procedentes de Demoliciones: Dosificaciones, Propiedades Mecánicas y Comportamiento Estructural a Cortante*". Tesis doctoral. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica A Coruña, 2002
- [GONZ05] GONZÁLEZ, B.; MARTÍNEZ, F.: "*Recycled aggregate concrete: aggregate and mix properties*". Materiales de construcción .Vol. 55, nº279, Noviembre de 2005
- [GONZ08] GONZÁLEZ-FONTEBOA B., MARTÍNEZ-ABELLA F. "*Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume.*" Materials and mechanical properties. Build Environ; 43: 429-437, 2008, doi:10.1016/j.buildenv.2007.01.008.
- [GONZ11] GONZÁLEZ-FONTEBOA B., MARTÍNEZ-ABELLA F., EIRAS-LÓPEZ J., SEARA-PAZ S. "*Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete.*" Mater Struct. 2011; 44: 1759-1771, doi: 10.1617/s11527-011-9736-7.
- [GONZ12] GONZÁLEZ-FONTEBOA B., MARTÍNEZ-ABELLA F., HERRADOR M.F, SEARA-PAZ S. "*Structural recycled concrete: Behaviour under low loading rate.*" Con Build Mat; 28: 111-116, 2012, doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.010

- [HAKA12] HAKAN Y., OZGUR E., SERHAN S. "*An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level*". Cement and Concrete Research; Vol. 42, p.p.643-655, 2012
- [HANS83] HANSEN, T. C.; NARUD, H.: "*Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate* "; Concrete International – Design and construction Vol 5 N°1; p.p. 79-83, January 1983.
- [HANS92] HANSEN, T. C.; SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, CH. F.; MOLIN, C.; LAURITZEN, E. K. "*Recycling of demolition concrete and masonry*" Report of Technical Committee 37-DCR Demolition and Reuse of Concrete. RILEM; Ed. T. C. Hansen; 1992
- [HASA81] HASABA S., KAWAMURA M., TORII K., TAKEMOTO K. "*Drying shrinkage and durability of the concrete made of recycled concrete aggregate*" Trans. Of Japan Concrete Institute Vol.3, p.p.55-60, 1981
- [HEND98] HENDRIKS, CH. F. "*Recycling of Building and Demolition Waste-An Integrated Approach*". Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction; Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya; pp. 419-431, 1998
- [HOLT01] HOLT, E. "*Early age autogenous shrinkage of concrete*". PhD Thesis, University of Washington, Seattle, 2001
- [HOLT05] HOLT, E. "*Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages*". Cement and Concrete Research; Vol. 35, 3, p.p.464-472, March 2005
- [JENS01] JENSEN O.M., HANSEN P.F. "*Autogenous deformation and RH-changes in perspective*". Cement and Concrete Research; Vol. 31, 12, p.p.1859-1865, 2001
- [KARA86] KARAA, T. "*Evaluation technique des possibilités d'emplois des déchets dans la construction – reserche experimentale applique au cas de bétons recycles*", These de doctorat de Université Paris 6. Paris Cedex 16, France, 1986
- [KASH88] KASHINO N.;TAKAHASHI, Y. "*Experimental Studies on Placement of Recycled Aggregate Concrete*". Proc. of the second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Nov. 1988, Japan
- [KATZ00] KATZ, A.: "*Recycling of partially hydrated concrete*". Waste Materials in Construction. Edited by G.R. Woolley; J.J.J.M. Goumans; P.J. Wainwright, p.p. 383-391, 2000
- [KATZ03] KATZ, A. "*Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete*". Cement and Concrete Research; Vol. 33, p.p.703-711, 2003
- [KAZI88] KAZIKAKI M., HARADA M., SOSHIRODA T., KUBOTA S., IKEDA T., KASAI Y.: "*strength and elastic modulus of recycled aggregate concrete*", Proceedings of the 2<sup>nd</sup> international RILEM symposium on demolition and reuse of concrete and masonry, Tokyo, Japan; pp.565-574, 1988



- [KHAN08] KHANDAKER M., HOSSAIN A. "*Bond characteristics of plain and deformed bars in lightweight pumice concrete.*" *Con Build Mat*; 22:1491-1499, 2088, doi: 10.1016/j.conbuildmat. 2007.03.025
- [KIKU98] KIKUCHI M.; DOSHO, Y.; NARIKAWA, M.; OHSHIMA, A.: "*Application of Recycled Concrete for Structural Concrete. Part 1- Experimental Study on the Quality of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate*". *Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction*; Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya; p.p. 55-68, 1998
- [KIM12] KIM Y., SIM J., PARK C.L. "*Mechanical properties of recycled aggregate concrete with deformed steel re-bar*". *Journal of marine science and technology*; Vol. 20, nº3: p.p. 274-280. 2012
- [KOU12] KOU S.C., POON C.S., WAN H.W. "*Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates*" *Construction and Building Materials* 2012; 36:881-889, doi: 10.1016/j.conbuildmat. 2007.03.025
- [KREI83] KREIJGER, P.C.: "*Hergebruik van Bouw-en Sloopafval als Toeslagmateriaal in Beton*", TH-Eindhoven, Afdeling Bouwkunde, Rapport M83-1, 1983
- [KWAN12] KWAN W.H., RAMLI M., KAM K.J., SULIEMAN M.Z. "*Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties* " *Con Build Mat* 2012; 26:565-573, doi: 10.1016/j.conbuildmat. 2011.06.059
- [LI08] LI X. "*Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I. Material behavior of recycled aggregate concrete*" *Resour. Conserv. Recy*, 53:36-44, 2008
- [LI12] LI Y., YAN Q.Q., DU X. "*Relationship between Autogenous Shrinkage and Tensile Strength of cement paste with SCM*" *J. Mater. Civ. Eng*, 24:1268-1273, 2012
- [LIJ04] LI J. "*Study on mechanical behavior of recycled aggregate concrete*" Master thesis, Tonhji University, Shanghai 2004
- [LIMB00] LIMBACHIYA, M.C., LEELAWAT, T., DHIR, R.K. "*Use of Recycled Concrete Aggregate in High-Strength Concrete*". *Materials and Structures*, Vol 33.. p.p. 574-580, Noviembre 2000
- [LIU05] LIU S., FANG K., ZENG L. "*Experimental study on mechanical properties of recycled aggregate concrete*" *Coalash China*, 5:18-9, 2005 (Chinese)
- [LIX08] LI X. "*Recycling and reuse of waste concrete in China. Part I. material behavior of recycled aggregate concrete*" *Resources, Conservation and recycling*, 53:36-44, 2008
- [LOPE09] LÓPEZ-GAYARRE F., SERNA P., DOMINGO-CABO A., SERRANO-LÓPEZ M.A., LÓPEZ-COLINA C. "*Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties.*" *Waste manag* 29, 2009, 3022-3028, doi:10.1016/j.wasman.2009.07.010
- [MALH78] MALHOTRA, V.M. "*Use of recycled concrete as a new aggregate*" *Proc. Of Symposium on energy and resource conservation in the cement and concrete industry*, CANMET, report nº76-8, Ottawa 1978

- [MANZ13] MANZI S., MAZZOTTI C., BIGNOZZI M.C. “*Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate*”, Cement and Concrete Composites; Vol. 37, p.p. 312-318, 2013
- [MAS12] MAS B., CLADERA A., DEL OLMO T., PITARCH F. “*Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use.*” Construction and building materials; Vol. 27; p.p. 612-622, 2012
- [MARU04] MARUYAMA I., SOGO M., SOGABE T., SATO R., KAWAI K. “*Flexural properties of reinforced recycled concrete beams*” International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures, 315, Barcelona 2004
- [MASA06] MASATO, T.; TAKAFUMI, N. “*Study of the application of low –quality recycled coarse aggregate to concrete structure by surface modification treatment*” Vol. November 2006
- [MC-10] MODEL CODE 2010-Final draft. The International Federation for Structural Concrete, FIB. Bulletin No 52 Fib, 2; Lausanne, Switzerland, 2012
- [MELL99] MELLMANN G. “*Processed concrete rubble for the reuse as aggregate*”, Proceedings of the international seminar on exploiting waste in concrete, Dundee, Scotland; pp. 171–178. 1999
- [MOLI04] MOLINA M, GUTIERREZ J.P, “*García M.D. Influencia del diámetro de la barra y del recubrimiento en las características adherentes del hormigón armado.*” Boletín Sociedad Española de Cerámicos Vol. 43; p.p. 560-564, 2004
- [MORO07] MOROHASHI N., SAKURADA T., YANAGIBASHI K: “Bond splitting of high-quality recycled coarse aggregate concrete beams” Journal of Asian Architecture and building engineering, 6(2) pp: 331-337, 2007
- [MOUN11] MOUNANGA P., BOUASKER M., PERTUE A., PERRONNET A., KHELIDJ A. “*Early-age autogenous cracking of cementitious matrices: physico-chemical analysis and micro/macro investigations.*” Materials and Structures Vol. 44; p.p. 748-772, 2011
- [MUKA88] MUKAI, T., KIKUCHI, M.: “*Properties of Reinforced Concrete Beams Containing Recycled Aggregate*”, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2 Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium; Ed. Y. Kasai; p.p. 670-679, Noviembre 1988
- [NEAL98] NEALEN A., SCHENK S. “*The influence of recycled aggregate core moisture on freshly mixed and hardened concrete properties.*” Darmstadt Concrete 1998; 13 (<http://www.b-i-m.de/public/tudmassiv/dacon13nealenschenk.htm>).
- [NEVI95] NEVILLE A.M. “*Properties of concrete.*” Pearson Education, 4<sup>th</sup> edition; 1995
- [NISH88] NISHBAYASHI, S.; YAMURA, K.: “*Mechanical Properties and Durability of Concrete from Recycled Coarse Aggregate Prepared by Crushing Concrete*”. Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2. Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, pp. 652-659, November 1988, Japan

- [NIXO87] NIXON, P.J. "*Recycled concrete as an aggregate for concrete – a review*" First state-of-the-art report RILEM TC-37-DRC. Materials and Structures (RILEM), nº65 p.p. 371-378, September-October 1987
- [NTC-08] Norme tecniche per le costruzioni integrate con la circolare applicative 14 Gennaio 2008, Circolare 2 febbraio 2009, n.617, C.S.LL.PP.-III edizione Sección 4. Costruzioni civili e industriali
- [OLIV96] OLIVEIRA BARRA M. "*Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado*". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 1996
- [PARR03] PARRA J.L., CASTILLA J., PALACIOS P., PUCHOL L. "*Áridos Reciclados para Hormigón. Prueba Industrial*". VII Jornadas Nacionales Sobre Aplicaciones Arquitectónicas de Materiales. E.T.S. de Arquitectura. Madrid, 2003
- [PERE12] PEREIRA P., EVANGELISTA L., BRITO J. "*The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregate*"; Cement & concrete composites, 34 pp. 1034-1042, 2012
- [PICK42] PICKETT G. "The effect of change in moisture-content of the creep of concrete under a sustained load", J Am. Concr. Inst, Vol. 38, pp:333-335, 1942
- [POON04] POON, A. "*Recycled Concrete as a Source of Aggregate*"; ACI Journal Vol 74, nº5; pp. 212-219, Mayo 2004
- [POON07] POON C.S., KOU S.C., LAM L. "*Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete*" Materials and Structures, 40, pp.981-988, 2007
- [RAHA08] RAHAL K. "*Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate*" Build Envir 42:407–415, 2008. doi:10.1016/j.buildenv.2005.07.033
- [RAO07] RAO A; JHA KN, MISRA S. "*Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete*", Resources, Conservation & recycling 50, pp.71-81, 2007
- [RAVI85] RAVINDRARAJAH, R.S.; TAM, C.T. "*Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate*", Magazine of Concrete Research Vol. 37, nº 130, March 1985
- [RAVI87] RAVINDRARAJAH, R.S.; LOO, Y.H.; TAM, C.T. "*Recycled Concrete as Fine and Coarse Aggregate in Concrete*". Magazine of Concrete Research, Vol. 39, nº 141, pp. 214-220. December 1987
- [RC6-83] RILEM TC9-RC (1983). RC 6 Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test. RILEM "*Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials*", pp. 18-220. 1994
- [RÜLH92] RÜLH, M. "*Water Absorption Capacity of Recycled Demolition Rubbish*". Darmstadt Concrete 97, Ausgabe 12, <http://www.b-i-m.de/public/tudmassiv/dacon97ruehl.htm>, 1992

- [SAFI13] SAFIUDDIN M., ALENGARAM U.J.B., RAHMAN M.M.B., SALAM M.A.B., JUMAAT M.Z. "Use of recycled concrete aggregate in concrete: A review." *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 19 (6), pp: 796–810, 2013
- [SAGO01] SAGOE-CRENTSIL, BROWN T., TAYLOR A.H. "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate." *Cem. Concr. Res*; 31: 707–712, 2001
- [SANC05] SANCHEZ DE JUAN, M. "Estudio sobre la Utilización de Árido Reciclado para la Fabricación de Hormigón Estructural". Tesis doctoral. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, 2005
- [SANC09] SANCHEZ DE JUAN M., ALAEJOS GUTIÉRREZ P. "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate." *Constr Build Mater*; 23: 872–877, 2009, doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012
- [SANG08] SANG K.J., WON S.L., HYUN D.Y. "Shear strength of reinforced concrete beams with recycled aggregates" *Tailor Made Concrete Structures – Walraven & Stoelhorst (eds)*, London 2008
- [SATO07] SATO, R., MARUYAMA, I. "Flexural behavior of reinforced recycled concrete beams"; *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 5 N°1 p.p. 43-61 Febrero 2007
- [SCHB04] SCHUBERT, S.R. "West Germany must Learn from Long Experience"; *Batiment International Building Research and Practice*, Vol 14/19 N°3; pp 154 – 159, 2004
- [SCHB12] SCHUBERT, S, HOFFMANN C, LEEMANN A, MOSER K, MOTAVALLI M. "Recycled aggregate concrete: experimental shear resistance of slabs without shear reinforcement"; *Engineering Structures*, Vol 4; pp 490–497, 2012
- [SCHU86] SCHULZ, R.R. "West Germany must Learn from Long Experience"; *Batiment International Building Research and Practice*, Vol 14/19 N°3; pp 154 – 159, 1986
- [SERN02] SERNA, P.; MARTÍ, J.R.; JIMÉNEZ, E. "Influencia de la temperatura en la adherencia de armaduras de acero al hormigón"; VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, Gandía 2002
- [SERR94] SERRA I. "Estudio experimental del comportamiento de vigas de hormigón armado descimbradas a tempranas edades". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 1994
- [SOLO10] SOLOMOS, G.; BERRA, M. "Rebar pullout testing under dynamic Hopkinson bar induced impulsive loading"; *Materials and Structures*; 43: 247-260, 2010 doi: 10.1617/s11527-009-9485-z.
- [THOM13] THOMAS C, SETIÉN J, POLANCO JA, ALAEJOS P, SÁNCHEZ DE JUAN M. "Durability of recycled aggregate concrete". *Construction and Building Materials*; Vol. 40, p.p.1054-1065, 2013

- [THOM14] THOMAS C, SETIÉN J, POLANCO JA, LOMBILLO I, CIMENTADA A. "*Fatigue limit of recycled aggregate concrete*". Construction and Building Materials; Vol. 52, p.p.146-154, 2014
- [TROC13] TROCOLI A, BATISTA M, DE JESUS K. "*Prediction of compressive strength of concrete containing construction and demolition waste using artificial neural networks*". Construction and Building Materials; Vol. 38, p.p.717-722, 2013
- [VOS82] VOS I, REINHARDT H. "*Influence of loading rate on bond behaviour of reinforcing steel and prestressing strands*." Materiaux et Constructions, 15 (1), pp. 3–10, 1982. doi: 10.1007/BF02473553
- [WANG07] WANG J, CHEN N, PU Q. "*Experimental study on behaviour of strength and durability of recycled aggregate concrete*" Chinese Concrete Journal, Vol. 35, p.p. 53–56, 2007 (in Chinese)
- [WESC82] WESCHE K., SCHULZ R. "*Beton aus aufbereitetem Altbeton – Technologie und Eigenschaften*" Beton, Vol.32, nº 2-3, p.p. 64-68, February and March 1982
- [XIAO05] XIAO J, LI J, ZHANG CH. "*Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading*". Cement and Concrete Research; Vol. 35, p.p.1187-94, 2005
- [XIAO07] XIAO J, FALKNER H. "*Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel rebars*". Construction and Building Materials; Vol. 21, p.p.395-401, 2007
- [XIAO12] XIAO J, WENGUIL L, YUHUI F, XIAO H. "*An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011)*". Construction and Building Materials; Vol. 31, p.p.364-383, 2012 doi:10.1016/j.conbuildmat. 2011.12.074
- [XIAJ12] XIAO J, XIE H, YANG Z. "*Shear transfer across a crack in recycled aggregate concrete*". Cement and Concrete Research; Vol. 42, p.p.700-709, 2012
- [XUNT08] XUNTA DE GALICIA "*Ley 10/2008 de Residuos de Galicia*", 2008
- [YAGI93] YAGISHITA, F., SANO, M., YAMADA, M. "*Behaviour of Reinforced Concrete Beams Containing Recycled Coarse Aggregate*". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium. Edited by Erik K. Lauritzen p. 331-342. 1993
- [YANG08] YANG YF. "*Concrete shrinkage and creep in recycled aggregate concrete-filled steel tubes*". Advances in Structural Engineering, 11 (4) pp: 383-396. 2008
- [YAMA88] YAMATO, T., EMOTO, Y., SOEDA, M., SAKAMOTO, Y. "*Some Properties of Recycled Aggregate Concrete*"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2 Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium; Ed. Y. Kasai; p.p. 643-651, Noviembre 1988
- [YUE93] YUE LL., TAERWE L. "*Two-function method for the prediction of concrete creep under decreasing stress*". Materials and structures, 26 (159) pp: 268-273. 1993

- [ZEGA06] ZEGA, C.J., TAUS, V.L., DI MAIO, A.A. "*Comportamiento físico-mecánico de hormigones reciclados elaborados con canto rodado*". IMME [online], vol. 44 (3), p.p. 17-26. 2006.
- [ZILC01] ZILCH K, ROOS F. "*An equation to estimate the modulus of elasticity of concrete with recycled aggregates*"; Civil Eng 76 (4):187-191; 2001 (in German)

